

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Ovlivnění lidského organismu nízkofrekvenčním hlukem
Effect of Low Frequency Noise on the Human Organism

Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Stuchlý**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3901R039 Biomedicínský technik
Téma: **Ovlivnění lidského organismu nízkofrekvenčním hlukem**
Effect of Low Frequency Noise on the Human Organism

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je získání informací o dostupné literatuře pro měření a vyhodnocování infrazvuku a jeho vlivu na lidský organismus, včetně jejich uplatnění ve vyhodnocení skutečných záznamů infrazvuků. Dále pak definování důležitých vlastností infrazvuku v souvislosti se sledováním vlivu na lidský organismus.

1. Prozkoumání literatury a návrh indikátorů, popř. biomarkrů pro sledování vlivu nf zvuku. (např. krevní tlak, puls, EEG, ...)
2. Návrh vhodné techniky pro sledování těchto indikátorů. (přenosná zařízení, možnost umístění osobám v rodinných domech, a podobně)
3. Vyhodnocení reálných měření. (měření hlučnosti a sledování příslušných indikátorů)
4. Návrh nebo doporučení vhodných indikátorů pro další epidemiologické studie související s nf hlukem.
5. Zhodnocení výsledků závěrečné práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ROCCHESO, Davide. *Introduction to Sound Processing*. Mondo Estremo, 2003. ISBN 8890112611, 9788890112614. Dostupné také z: <http://profs.sci.univr.it/~rocchess/SP/sp.pdf>
- [2] *Infrasound* – Briew Review of Toxicological Literature. *Infrasound Toxicological Summary* November 2001 [cit. 2011-10-02]. Dostupné z: http://ntp.niehs.nih.gov/ntp/htdocs/Chem_Background/ExSumPdf/Infrasound.pdf
- [3] ČSN ISO 7196: *Akustika – Frekvenční váhová funkce pro měření infrazvuku*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 12 s. Třídící znak 011625.
- [4] ČSN EN 61672-1: *Elektroakustika – Zvukoměry – Část 1: Technické požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2003. 36 s. Třídící znak 368813.
- [5] LEVENTHALL, Geoff. *What is infrasound?* *Prog Biophys Mol Biol*, January–April 2007. Volume 93, Issues 1–3, Pages 130–137. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079610706000848>
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16934315>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Richard Velička, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2015



doc. Ing. Jiří Kozíorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 31.7.2015...


.....
Martin Stuchlý

Děkuji tímto Ing. Richardu Veličkovi, Ph.D., vedoucímu mé bakalářské práce, za odborné vedení, věcné připomínky a rady, které mi poskytl během zpracování této práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou nízkofrekvenčního hluku a jeho vlivem na lidský organismus. Ve svém úvodu se práce zabývá obecnějšími informacemi z oblasti akustiky a zvuku. V následujících částech práce je hlavní pozornost soustředěna na vlastnosti infrazvuku, techniky a prostředky pro měření a vyhodnocování nízkofrekvenčního hluku. Uvedeny jsou i způsoby měření infrazvukových vlnění a určování jejich akustických hladin, zjišťování frekvenčního spektra prostřednictvím frekvenční analýzy a určování a lokalizace zdrojů infrazvuku. Navržena jsou možná reálná měření (měření hluku a sledování příslušných indikátorů) – měřicí řetězec. V samém závěru práce jsou shrnuty hlavní poznatky vlivu nízkofrekvenčního hluku (infrazvuku) na lidský organismus, které byly dosud prokázány provedenými studiemi a výzkumy.

Klíčová slova

Infrazvuk, nízkofrekvenční hluk, zvukoměr, frekvenční analýza, vibrace, lidský organismus

Abstract

The Bachelor thesis deals with the low-frequency noise and its effects on the human body. In the beginning, the submitted Bachelor thesis deals with general informations in the field of acoustics and sound. In the following parts of Bachelor thesis the main attention is focused on the characteristics of infrasound, technique and devices for measuring and evaluation of low-frequency noise. There are mentioned ways of measuring the infrasonic waves, determining their acoustic levels, the frequency spectrum by frequency analysis, identifying and localizing sources of infrasound. The Bachelor thesis also contains design of possible real measurements (measurement of noise and monitoring of relevant indicators) – measuring string. Main findings of influence of low frequency noise (infrasound) on the human body that have been so far proven by research and studies are summarized in the conclusion of the Bachelor thesis.

Key Words

Infrasound, low frequency noise, sound level meter, spectral analysis, vibrations, human body

Seznam použitých zkratk

AC	Alternating Current (střídavý proud)
ČSN	české technické normy
ČSN EN	harmonizovaná česká technická norma (EN – European Standard)
DC	Direct Current (stejnoseměrný proud)
EEG	elektroencefalogram
EIONET	Evropské informační a pozorovací síť pro životní prostředí
EU	Evropská unie
FFT	Fast Fourier Transform (rychlá fourierova transformace)
ISO	International Organization for Standardization (mezinárodní technické normy)
lin	lineární
log	logaritmický
RLC	obvod složený z rezistoru, cívky a kondenzátoru
SZÚ	Státní zdravotnický ústav

Seznam použitých symbolů

$A \text{ (m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	pohltivost
$c \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	rychlost zvuku
$f \text{ (Hz)}$	frekvence
$I \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}$	akustická intenzita
$f_t \text{ (Hz)}$	frekvence středních kmitočtů třetinooktávových pásem
$I_0 \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}$	referenční akustická intenzita
$I_{\max} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}$	akustická intenzita rovna prahu bolesti
$l \text{ (m)}$	vzdálenost
$L_{eq} \text{ (dB)}$	ekvivalentní hladina
$L_I \text{ (dB)}$	hladina akustické intenzity
$L_{IG} \text{ (dB)}$	hladina akustické intenzity s použitím váhového filtru G
$L_P \text{ (dB)}$	hladina akustické tlaku
$L_{pG} \text{ (dB)}$	hladina akustické tlaku s použitím váhového filtru G
$L_{PS} \text{ (dB)}$	hladina prahu slyšení
$L_W \text{ (dB)}$	hladina akustické výkonu
$L_{WG} \text{ (dB)}$	hladina akustické výkonu s použitím váhového filtru G
$p \text{ (Pa)}$	akustický tlak
$p_0 \text{ (Pa)}$	referenční akustický tlak
$T \text{ (s)}$	perioda
$v_r \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	akustická rychlost částic
$W \text{ (W)}$	akustický výkon
$W_0 \text{ (W)}$	referenční akustický výkon
$\lambda \text{ (m)}$	vlnová délka

Obsah

1. Úvod.....	2
2. Akustika a zvuk.....	3
2.1 Akustika.....	3
2.1.1 Energetické hodnoty v akustice.....	3
2.2 Zvuk.....	5
2.2.1 Šíření zvuku.....	5
2.2.2 Vlastnosti zvuku.....	7
3. Hluk.....	9
3.1 Maskování hluku.....	9
3.2 Metody eliminace hluku.....	9
3.3 Vnímání zvuku sluchovým ústrojím člověka.....	10
4. Infrazvuk.....	13
4.1 Zdroje infrazvuku.....	13
4.1.1 Přírodní zdroje infrazvuku.....	13
4.1.2 Umělé zdroje infrazvuku.....	14
4.2 Vnímání infrazvuku sluchovým ústrojím člověka.....	14
5. Měření zvuku (hluku).....	16
5.1 Zvukoměr (hlukoměr).....	16
5.2 Frekvenční analýza infrazvukového signálu.....	24
5.3 Měření hladin akustické intenzity.....	24
5.4 Měření hladin akustického výkonu.....	26
5.4.1 Měření ve volném poli.....	26
5.4.2 Měření v difuzním poli.....	27
5.4.3 Měření pomocí akustické intenzity.....	28
5.5 Měření vibrací.....	28
5.6 Další zařízení pro měření infrazvuku.....	30
5.7 Obecná pravidla při měření zvuku (hluku).....	31
6. Vliv infrazvuku a nízkofrekvenčního hluku na lidský organismus.....	32
6.1 Závěry zveřejněných studií vlivu infrazvuku na lidské zdraví.....	34
7. Hygienické limity pro infrazvuková vlnění.....	37
8. Pracoviště zabývající se měřením infrazvuku a jeho vlivem na lidský organismus.....	39
9. Návrhy a doporučení pro provedení reálných měření – použití měřících přístrojů a sledování indikátorů.....	40
9.1 Měřicí systémy (řetězce).....	40
9.2 Indikátory.....	44
10. Závěr.....	45
11. Seznam použité literatury.....	46

1. Úvod

Nízkofrekvenční hluk a jeho vliv na lidský organismus je v současné době stále více aktuální otázkou. Nepříznivý vliv hluku na lidské zdraví si stále více lidí neuvědomuje. Nedomýšlí, co všechno může hluk způsobit.

Hluk poměrně významně ovlivňuje psychiku člověka, může způsobovat depresi, vyvolávat agresivní chování, způsobovat únavu, zhoršovat paměť a v neposlední řadě způsobovat ztrátu pozornosti a celkové snížení výkonnosti.

Dlouhodobé působení nadměrné hlukové zátěže pak může vést ke zvýšení krevního tlaku, zvýšení rizika srdečních onemocnění, snížení imunity organismu, nespavosti a chronické únavě. Výskyt těchto civilizačních chorob vzrůstá dle některých výzkumů s hlučností daného prostředí.

Dalším následkem působení hluku na zdraví je pak pochopitelně i poškození sluchu. K tomu může docházet při krátkodobém působení hluku přesahujícím 130 dB, nebo častému vystavování hluku nad 85 dB. K poškození sluchu ale může dojít i při dlouhodobém vystavení hluku okolo 70 dB, což je úroveň hluku kolem hlavních silnic.

Tato bakalářská práce se ve svém úvodu zabývá obecnějšími informacemi z oblasti akustiky a zvuku. Dále je pozornost soustředěna na klasifikaci nízkofrekvenčního hluku (infrazvuku), vlastnosti infrazvuku, techniky a prostředky pro měření a vyhodnocování nízkofrekvenčního hluku. Uvedeny jsou i způsoby měření infrazukových vlnění, určování jejich akustických hladin, zjišťování frekvenčního spektra prostřednictvím frekvenční analýzy a určování a lokalizaci zdrojů infrazvuků. V neposlední řadě se práce věnuje účinkům hluku na lidské zdraví a legislativním limitům pro hluk.

Navržena jsou možná reálná měření (měření hlučnosti a sledování příslušných indikátorů) – měřicí řetězec.

V samém závěru práce jsou pak shrnuty hlavní poznatky vlivu nízkofrekvenčního hluku (infrazvuku) na lidský organismus, které byly dosud prokázány provedenými měřeními a výzkumy a uvedena doporučení v této oblasti.

2. Akustika a zvuk

2.1 Akustika

Akustika, jakožto rozsáhlý vědní obor, se zabývá ději, které jsou spojeny se vznikem zvukového vlnění, jeho šířením, vnímáním zvuku sluchem a přenosu prostorem až po vnímání lidskými smysly.

Má celou řadu poddisciplín:

- **fyzikální akustika** se zabývá vznikem, šířením zvuku a odrazivostí,
- **elektroakustika** se zabývá záznamem, reprodukcí a šířením zvuku, vzhledem k elektrickému proudu,
- **hudební akustika** zkoumá fyzikální základy hudby, hudebních nástrojů a prostorů,
- **stavební akustika** zkoumá zvukové jevy a souvislosti v uzavřeném prostoru, budovách a stavbách,
- **prostorová akustika** se zabývá šířením zvuku v obecném prostoru,
- **fyziologická akustika** se zabývá vznikem zvuku v hlasovém orgánu člověka a jeho vnímáním v uchu,
- **psychoakustika** zkoumá vnímání zvuku v mozku.

[1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10]

2.1.1 Energetické hodnoty v akustice

Energetické veličiny mají z fyzikálního pohledu mimořádný význam. Většinou se problém může vyřešit energeticky, a toto řešení bývá jednodušší než řešení pomocí jiných veličin. Tyto zásady platí i v akustice.

Akustický tlak

Akustický tlak je popsán jako rozdíl mezi okamžitou velikostí celkového tlaku v daném bodě zvukového pole a statickou hodnotou atmosférického tlaku. Jeho hodnota je tedy proměnlivá a je přičítána k atmosférickému tlaku. Tlak střídavě stoupá nad a pod konstantní hodnotu, z tohoto důvodu je akustický tlak určen efektivní hodnotou tlaku celého cyklu.

Akustický výkon

Akustický výkon je množství celkové akustické energie, která je vysílána ze zdroje nebo která prochází danou plochou. Jinými slovy se jedná o výkon, který je přenášen akustickým vlněním. Akustický výkon je základní a nejdůležitější veličinou, která popisuje akustické vlastnosti zdroje zvuku.

Akustická intenzita

Akustická intenzita je měřítkem akustické energie procházející jednotkou plochy. Jedná se o vektorovou veličinu, popisující velikost a směr toku energie.

Energetické veličiny charakterizující akustické vlnění se mění od velmi nízkých hodnot při slabých zvucích až po mnohonásobně větší hodnoty při silných zvucích. Testováním se zjistilo, že akustický tlak na hranici slyšitelnosti při 1 000 Hz je 20 μPa a naproti tomu akustický tlak spojený s prahem bolesti je přibližně 200 Pa. Pro rozsah akustické intenzity je to přibližně od 10⁻¹² W/m² do 10 W/m². Z toho vyplývá, že lidské ucho vnímá zvuk spíše v logaritmické stupnici, zavádí se tedy logaritmické měřítko, které umožní výše zmíněné veličiny uvádět jako hladiny akustických veličin.

Na základě Weberovo-Fechnerova fyziologického zákona, který předpokládá, že smyslové vnímání člověka je úměrné logaritmu podnětu, se používá i pro základní akustické veličiny logaritmická míra vyjádřená hladinou. Hladina se definuje jako logaritmický poměr určité vibračně-akustické energetické veličiny k stanovené referenční hodnotě této veličiny. Pro hladinu se zavedla jednotka bel, resp. její desetinásobek decibel, která nemá fyzikální dimenzi a je číselnou jednotkou.

[1], [2], [3], [4]

Vzorec pro výpočet hladiny akustického tlaku:

$$L_p = 20 \cdot \log \left(\frac{p}{p_0} \right), \quad (1)$$

kde:

p - sledovaný akustický tlak,

p_0 - referenční akustický tlak o hodnotě $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

Vzorec pro výpočet hladiny akustického výkonu:

$$L_w = 10 \cdot \log \left(\frac{W}{W_0} \right), \quad (2)$$

kde:

W - sledovaný akustický výkon,

W_0 - referenční akustický výkon o hodnotě $W_0 = 10^{-12}$ W.

Vzorec pro výpočet hladiny akustické intenzity:

$$L_I = 10 \cdot \log \left(\frac{I}{I_0} \right), \quad (3)$$

kde:

I - sledovaná akustická intenzita,

I_0 - referenční akustická intenzita o hodnotě $I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

[1], [4], [5], [6], [8], [9], [10], [11]

2.2 Zvuk

Zvuk lze definovat jako mechanické kmitání (vlnění), které se šíří ve všech pružných prostředích. Část zvuků, která náleží do frekvenčního pásma 20 Hz až 20 kHz se projevuje pro lidské ucho jako slyšitelný zvuk. Hranice tohoto pásma jsou nejednotné a v různých publikacích se můžeme setkat s rozlišnými hodnotami. Jedná se o průměrné hodnoty slyšitelnosti lidské populace. Z toho vyplývá, že pro jednotlivce mohou být tyto mezní hodnoty značně odlišné. Zvuky spadající mimo toto pásmo neslyšíme, ale i tak jsme je schopni vnímat. Tyto zvuky mohou působit nepříznivě na lidské zdraví či psychiku.

Vzhledem k slyšitelné hranici lidského ucha, rozlišujeme 3 základní typy zvukového vlnění:

- **infrazvuk** - zvuk pod slyšitelnou hranicí ($< 20 \text{ Hz}$),
- **slyšitelný zvuk** - zvuk ve frekvenčním pásmu ($20 \text{ Hz} - 20 \text{ kHz}$),
- **ultrazvuk** - zvuk nad slyšitelnou hranicí ($> 20 \text{ kHz}$).

Zdrojem zvuku je chvění pružných těles, které se přenáší do okolního prostředí a vyvolává v něm zvukové vlnění. To vzniká kmitáním bodů a bodových soustav, tedy jejich kmitavým pohybem, kde se v závislosti na čase periodicky mění charakteristické veličiny (poloha, rozměr, tlak, rychlost atd.).

[1], [2], [5], [6], [7], [8], [12]

2.2.1 Šíření zvuku

Ze zdroje zvuku se zvuk může šířit v pružném látkovém prostředí plynného, tekutého i pevného prostředí jako akustické vlnění. Hmotné body daného prostředí se nepohybují jednosměrně se šířícím se vlněním, ale kmitají pouze kolem svých rovnovážných stavů. V různých prostředích se zvuk šíří s jinými vlastnostmi. Ve všech prostředích se jedná o postupně podélné vedení, což znamená, že hmotné částice daného pružného prostředí kmitají ve směru šíření, kterým vlnění postupuje.

V pevném prostředí se navíc může šířit i vlnění postupné příčné. Hmotné body prostředí u tohoto typu vlnění kmitají kolmo na směr šíření vlny. Toto vlnění se v pevných látkách může vyskytovat z důvodu existence smykového napětí.

Jako nejvýznamnější charakteristiku prostředí, z hlediska šíření zvuku můžeme uvést velikost rychlosti zvuku v daném prostředí. V 17. století byl proveden pokus, kdy se na základě výstřelu z děla a z předem známé vzdálenosti, měřila doba, která uběhla od záblesku do doby, než bude slyšet zvuk výstřelu. Vzhledem k velikosti rychlosti světla k velikosti rychlosti zvuku, lze říci, že světelný záblesk byl zaznamenán okamžitě, zatímco sluchový s určitým zpožděním. Tím tento pokus umožnil poměrně přesně určit rychlost zvuku ve vzduchu.

Rychlost zvuku je v kapalinách a pevných látkách větší než ve vzduchu. Rychlost šíření zvukového vlnění v daném prostředí závisí na hustotě daného materiálu, ale také na jeho pružnosti. Příklady rychlostí šíření zvuku v různých látkách jsou uvedeny v **tabulce 1**.

Tabulka 1: Rychlost šíření zvuku v látkách [1], [8], [9], [10].

Látka	$c \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})$	Látka	$c \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})$
Vzduch 0 °C	332	Olovo	1410
Vzduch 20 °C	344	Bukové dřevo	3900
Dusík 0 °C	334	Hliník	4800
Helium 0 °C	971	Ocel	5750
Vodík 0 °C	1286	Beton	3100
Voda 13 °C	1440	Cihly	2800
Petrolej 25 °C	1315	Sklo	5270
Aceton 20 °C	1190	Plexisklo	1580
Rtuť 20 °C	1451	Tvrdá pryž	1400
Glycerin 20 °C	1923	Měkká pryž	70

Zvuková vlna postupuje všemi směry prostorem v tzv. vlnoplochách. Vlnoplochu můžeme definovat jako plochu, jejíž body kmitají se stejnou fází. Jedná se tedy o všechny body zvukového pole mající v daný čas stejné parametry. U malého zvukového zdroje, tzv. bodového zdroje, jsou vlnoplochy kulovitého tvaru. Pokud je zdroj např. rozměrná deska jedná se o rovinné vlnoplochy. Vzdálenost mezi dvěma vlnoplochami popisuje vlnová délka λ . Tvar vlnoploch může být ovlivněn překážkou, na které vlnění naráží. V této situaci dochází k mnoha jevům, při kterých se také mění část zvuku na jinou formu energie (teplo). Dále může dojít k odrazu, ohybu, prostoupení nebo také k pohlcení části vlnění. Je možné, že dojde k rozkmitání překážky tak, že se vlny odečtou a překážka se začne chovat jako by veškerou akustickou energii pohlcovala. K jakému jevu dojde, určují rozměry, složení a tvar překážky, vlnová délka zvukové vlny a jiné vlastnosti.

[1], [2], [3], [5], [8], [9], [12]

2.2.2 Vlastnosti zvuku

Mezi nejdůležitější vlastnosti zvuku patří:

- výška zvuku,
- barva zvuku,
- hlasitost zvuku.

Tyto tři charakteristiky zvuku jsou základem pro určování subjektivního hodnocení zvukového vjemu.

Výška zvuku je určena výhradně u tónů a je popsána frekvencí, kde s rostoucí frekvencí roste i výška tónu.

Barva tónu označuje skutečnost, že každý tón má pro lidské ucho charakteristický zvuk, což způsobuje obsah harmonických tónů v tónu složeném. Barvu tónu určují také amplitudy již zmíněných harmonických tónů a jejich počet. Pomocí této vlastnosti může lidský sluch rozlišit dva složené tóny se stejnou absolutní výškou vydané dvěma různými zdroji zvuku. To, že zvuky mají rozdílnou barvu, je dáno nestejným vznikem zvuku v rezonátorech, které mají např. jiný tvar, velikost a materiál.

Hlasitost zvuku

Lidským uchem vnímáme zvuky o určité hlasitosti. Jedná se o další subjektivní veličinu, která závisí na citlivosti sluchu. K objektivnímu hodnocení zvuku byla zavedena intenzita zvuku, která je přímo úměrná energii kmitání vzbuzované zvukovým vlněním v daném bodě. Tato energie pak závisí na druhé mocnině amplitudy výchylky (maximální výchylky) a na druhé mocnině frekvence. Intenzitu zvuku tedy určují nejen změny tlaku vzduchu v daném místě, ale také výška tónu.

[3], [5], [8], [12]

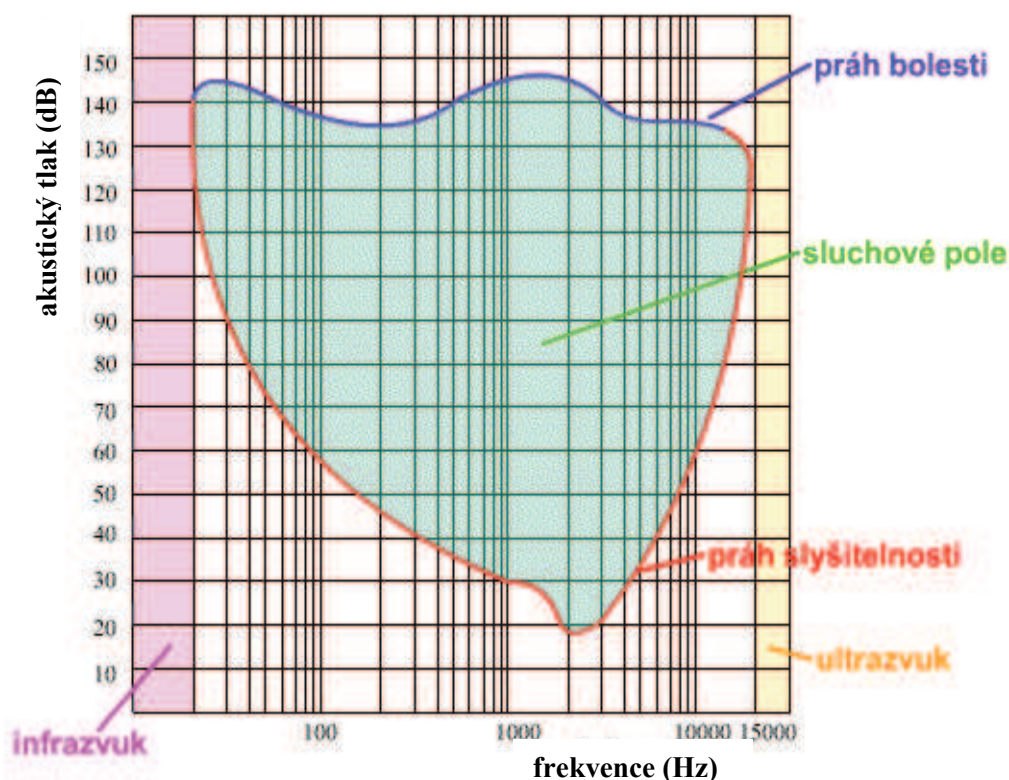
V souvislosti s citlivostí ucha se zavádějí dvě hranice intenzity zvuku:

- **práh slyšení** – nejnížší slyšitelná intenzita referenčního tónu ($I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$),
- **práh bolesti** – nejvyšší intenzita zvuku, která ještě bolest nezpůsobí ($I_{\max} = 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$).

Tyto hranice jsou součástí tzv. sluchového pole, které nám ukazuje zvuky vyvolávající u lidského sluchového ústrojí vjem. Průměrné zvukové pole je uvedeno na **obrázku 1**. Každý jednotlivec má individuální zvukové pole. Hlavním parametrem určujícím účinek zvuku je již zmíněná intenzita. V prostředí s velmi nízkou hladinou akustického tlaku se člověk necítí dobře. Hladina okolo 20 dB je lidmi považována za ticho, hladina o něco vyšší (30 dB) je považována za ticho příjemné. U hladin nad 65 dB se začínají ukazovat účinky hluku (například změnami vegetativních reakcí). U hladiny vyšší než 85 dB už může docházet k trvalým poruchám sluchu, také se více projevují účinky

na vegetativní systém a celou nervovou soustavu. Přibližně od hladiny 130 dB se obvykle účinky hluku projevují jako bolesti sluchového ústrojí a při hladině okolo 160 dB dochází k protržení bubínku sluchového ústrojí.

[1], [3], [4], [7], [8]



Obrázek 1: Sluchové pole [1], [7].

Typy zvuků z hlediska lidského vnímání můžeme rozdělit do dvou skupin:

Tóny (hudební zvuky) - při vytvoření grafu závislosti intenzity zvuku na čase je výsledkem periodická funkce, jsou tedy vytvořeny periodickým vlněním. Jako příklady tónů můžeme uvést zvuky hudebních nástrojů.

Hluky (nehudební zvuky) - při vytvoření grafu závislosti intenzity zvuku na čase je výsledkem neperiodická funkce, jsou tedy vytvořeny neperiodickým vlněním. Příkladem hluku je např. šum, praskání, skřípání).

[3], [5], [8]

3. Hluk

Hlukem je označována specifická forma zvuku, tu lze z fyzikálního hlediska popsat jako nepravidelné nebo náhodné kmitání. Z hlediska subjektivního člověk vnímá hluk jako nepříjemný, rušivý, obtěžující, nežádoucí či škodlivý zvuk. Hluk může ovlivňovat nejen člověka, ale i jeho majetek či životní prostředí. Svým způsobem může být hlukem i hudba, která bude příliš hlasitá, přestože se jedná o periodické vlnění. Vnímavost hluku je ovlivněna velkým počtem faktorů jako například informační obsah, doba trvání, věk, zdravotní stav nebo postoj posluchače. Nadměrný hluk může také negativně ovlivňovat kvalitu a produktivitu práce a je také rizikovým faktorem u bezpečnosti práce. Pro tyto vlivy patří hluk k důležitým environmentálním faktorům.

[1], [4], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19]

3.1 Maskování hluku

Jedná se o jev, kdy je ucho vystaveno dvěma zvukům o rozdílných hladinách současně. Jestliže se tyto hladiny liší o více než 10 dB, je příspěvek nižšího zvuku do výsledné hladiny méně než 1 dB, nachází se tedy pod hranicí slyšitelnosti. Slabší zvuk je překryt zvukem silnějším a není vnímán. Tento jev se nazývá maskování neboli „masking effect“. Maskování hluku se používá například pro překrytí slabých, avšak nepříjemných hluků zvuky silnějšími a také příjemnějšími, například šum a ruch lidí se může překrýt hudbou.

[1], [4], [5]

3.2 Metody eliminace hluku

Základní metody eliminace hluku:

Metoda redukce hluku ve zdroji se provádí tak, že se zdroj hluku úplně odstraní, popřípadě se jen sníží jeho hlučnost (např. tlumením vibrací pracovních strojů).

Metoda dispozice je vhodné umísťování hlučných strojů a zařízení. Tato metoda se využívá při územním plánování, projektování průmyslových zón, dopravních komunikací, atd. Tyto nežádoucí objekty, stroje aj. jsou tedy postaveny v dostatečné vzdálenosti, aby neměly negativní vliv na lidskou komunitu.

Metoda izolace využívá odizolování stroje, zařízení nebo celého hlučného prostoru od prostoru chráněného. K tomu se využívají zvukoizolační příčky, stropy, kryty, apod.

Metoda využívající zvukové pohltivosti materiálů spočívá ve vlastnosti některých materiálů pohlcovat akustickou energii a přeměňovat ji na energii tepelnou. Nejčastěji je aplikována uvnitř místností.

Metoda využívající osobní ochranné pomůcky zahrnuje používání sluchátek, přileb a zvukových zátek do uší. Tato metoda se používá, když není možné provést metody výše uvedené, popřípadě k ještě lepšímu snížení hlukové expozice člověka.

Nejúčinnější cesta k eliminaci hluků je vhodně kombinovat zmíněné metody.

[2], [9], [13], [15], [18], [19]

3.3 Vnímání zvuku sluchovým ústrojím člověka

Sluchovými vjemy zachycenými lidským sluchovým ústrojím z prostředí se zabývá fyziologická akustika. Sluchový vjem můžeme popsat jako uchem zachycenou akustickou informaci, která je následně zpracovávána mozkem. Jak již bylo zmíněno, sluchovým smyslovým orgánem je ucho. Jedná se o orgán párový, který se dělí na tři hlavní části:

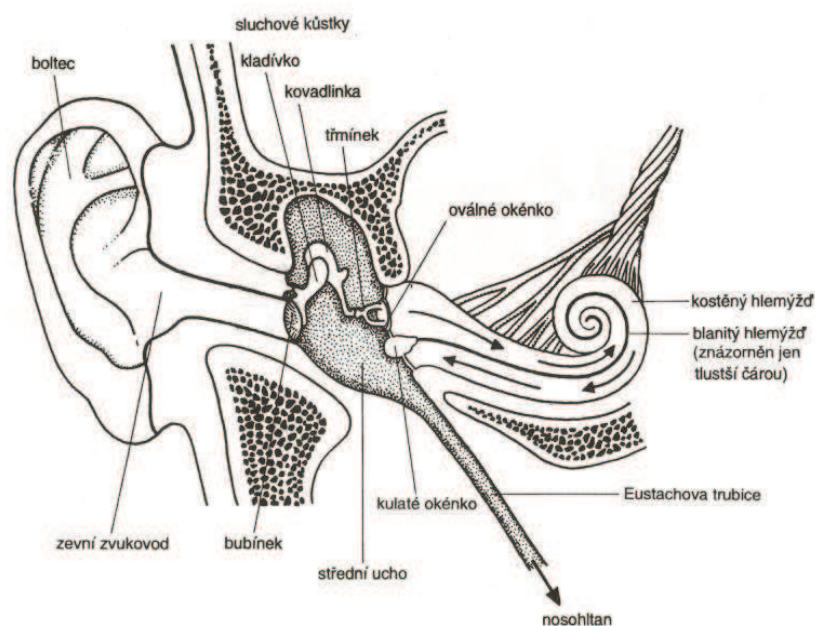
- **ucho vnější** (auris externa) je složeno z ušního boltce, zevního zvukovodu, na jehož konci se nachází ušní bubínek,
- **ucho střední** (auris media) se nachází v kosti spánkové a jedná se o dutinu. Se zevním zvukovodem je spojeno přes bubínek. Tlak zde vyrovnává Eustachova trubice. Dále se zde nachází tři sluchové kůstky: kladívko, kovádlínka a třmínek,
- **ucho vnitřní** (auris interna) se nachází v dutinách kosti skalní, v tzv. kostěném labyrintu. Tento labyrint se skládá z předsíně, tří polokruhovitých kanálků a kostěného hlemýždě.

Popis sluchového ústrojí je uveden na **obrázku 2**.

Vnější ucho slouží k zachycení zvukových vln z prostředí a jejich následnému odeslání na bubínek pomocí zvukovodu. Ušní boltec přitom slouží jako „trychtýř“, má tedy směrový efekt pro zlepšení příjmu zvukové vlny. Ve zvukovodu dochází k zesílení frekvence, funguje tedy jako akustický rezonátor.

Ušní bubínek tvoří překážku ve zvukovodu, která odděluje vnější a střední část ucha. Jedná se o pružnou vazivovou blánu kónického tvaru obrácenou směrem dovnitř. Chvění bubínku je přenášeno na kladívko, pomocí něhož je dále přenášeno na kovádlínku, třmínek a na oválné okénko, které je spojkou středního a vnitřního ucha. Střední ucho slouží jako převodní mechanismus, který převádí akustické vlnění zachycené bubínkem do vnitřního ucha, ve kterém je kapalně prostředí. Tento hydrodynamický přenos vyrovnává rozdíly akustického tlaku mezi vnějším plynem a tekutinou

ve vnitřním uchu. Při tomto procesu dochází ke zvýšení tlaku zvukového vlnění na vstupu do ucha vnitřního, na čemž se podílí pohyb sluchových kůstek, které jsou funkční částí Eustachovy trubice ústící do nosohltanu, a rozdíl v plochách bubínku a oválného tělíska, které má plochu mnohem menší. Výsledkem tohoto procesu je asi 20krát vyšší tlak na kapalinu ve vnitřním uchu. Vzhledem k možnosti útlumu zvuku až o 15 dB má střední ucho také funkci ochrannou.



Obrázek 2: Popis sluchového ústrojí [1].

Změny tlaku vzduchu jsou ve středním uchu převedeny na mechanické pohyby. Vzniklé vibrace postupují k vnitřnímu uchu, kde rozpohybují tekutiny vnitřního ucha, tedy endolymfu a perilymfu. Vnitřní ucho se skládá ze systému chodbiček, který je sídlem dvou analyzátorů:

- **vestibulárního**, který podává informace o vnímání polohy a pohybu,
- **sluchového**, který je tvořen hlemýžďem.

V blanitém hlemýždi je uložen tzv. Cortiho sluchový orgán obsahující řady nepatrných řasnatých buněk. Tlakové vlny rozpohybují přes membránu endolymfu a perilymfu, která dráždí smyslové buňky Cortiho orgánu. Podrážděné smyslové buňky přeměňují zvukový signál na elektrický, který je nervovými drahami veden do mozku, kde jsou tyto podněty dále zpracovávány.

Zvukové vlnění může proudit k receptorům ve vnitřním uchu těmito způsoby:

- **kůstkové vedení** je přenos pomocí kůstek ve středním uchu využívající převodní a transformační funkce kůstek. Je to hlavní způsob vedení zvuku u zdravého člověka.

- **kostní vedení** vede akustické vibrace přímo kostí lebeční do tekutiny uvnitř ucha. K tomuto vedení dochází při poruše kůstkového vedení a při silných zvucích.
- **vzduchové vedení** je způsob vedení, kdy je vlnění vzduchem přenášeno přímo k oválnému okénku ve středním uchu. U zdravého člověka je to způsob velmi omezený.

Lidské sluchové ústrojí je velmi složité a jeho originalitě se zavedl pojem ontologicky normální osoba. Jedná se o myšlenou osobu, se sluchovým orgánem splňujícím vlastnosti dané konvencí zjištěné ze statistického průměru zdravých lidí ve věku 18 až 25 let.

[1], [5], [8], [15], [20]

4. Infrazvuk

Infrazvukové vlny byly odhaleny teprve v roce 1883, když došlo k erupci sopky Krakatoa v Indonésii. Tato erupce následně vyslala infrazvukovou megavlnu, která proletěla zemskou atmosférou a několikrát oběhla Zemi. Zkoumání infrazvukových vln se rozvíjelo zejména od 50. let 20. století, kdy Spojené státy a tehdejší Sovětský svaz rozvíjely infrazvukové detektory, které sloužily k odhalování nukleárních zkoušek v atmosféře.

Infrazvukem rozumíme mechanické vlnění v pružném prostředí s frekvencí pod hranicí slyšitelnosti, která je udávána v rozmezí 16 Hz až 20 Hz. Dolní mez infrazvuku se pohybuje v rozmezí 0,001 Hz až 0,2 Hz. Infrazvuk je charakteristický velkou vlnovou délkou, která se pohybuje od 17 m (vlnová délka pro frekvenci 20 Hz) směrem nahoru v závislosti na frekvenci, což umožňuje jeho rozsáhlé šíření.

Vzorec pro výpočet vlnové délky λ :

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (4)$$

kde:

c – rychlost šíření rozruchu,

f – kmitočet vlnění.

Například vlnová délka u vlnění s frekvencí 5 Hz vzduchem o teplotě 20 °C, kde rychlost šíření je rovna 344 m·s⁻¹ se počítá:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{344}{5} = 69 \text{ m.}$$

[5], [13], [14], [21], [22], [23], [24], [25], [26]

4.1 Zdroje infrazvuku

Infrazvuk je přítomen ve všech prostředích a prostorech. Moderní člověk se s ním setkává prakticky neustále. Rozlišujeme dva druhy zdrojů infrazvuku:

- **přírodní zdroje,**
- **umělé zdroje.**

4.1.1 Přírodní zdroje infrazvuku

Mezi přírodní zdroje infrazvuku můžeme uvést zemětřesení, sopečné erupce, bouře, vodopády, polární záře, mořské vlny, silný vítr, atd. U všech jevů je spolu s infrazvukovým vlněním vytvářeno i slyšitelné zvukové vlnění. Jako další zdroj můžeme uvést některá zvířata. Typickým druhem využívajícím infrazvuk ke komunikaci jsou sloni, těm umožňuje komunikaci až na vzdálenost 10 kilometrů. Dále infrazvuk využívají také velryby, které jsou schopny komunikovat až na několik set kilometrů. Mezi další zvířata používající infrazvukové vlnění patří hroši, nosorožci, okapi, aligátoři aj. Jako zajímavost bych uvedl situaci, která nastala při tsunami v roce 2004 v Indickém oceánu. Zvířata začala opouštět pobřeží dlouho před příchodem tsunami. Předpokládá se, že za to může infrazvuk, který byl šířen před touto pohromou. Následně byl zvířaty zaznamenán a ty se mohly včas vzdálit.

4.1.2 Umělé zdroje infrazvuku

Umělými zdroji produkujícími infrazvukové vlnění jsou např. dopravní prostředky, vibrační třídiče, dieselové agregáty lokomotiv, lodí nebo elektrocentrál. Mezi další zdroje spadají také diskotéky, exploze a vibrace mostních konstrukcí. Mezi zdroje, které se mohou nacházet v domácnostech, můžeme zařadit i některé spotřebiče: klimatizační a vzduchotechnické systémy, automatické pračky, chladničky aj. U lednice a klimatizace jsou vytvářeny infrazvuky s nižšími hodnotami akustického tlaku, než u automatické pračky. Jízda automobilem vystavuje řidiče i pasažéry infrazvuku v rozmezí od 1 do 20 Hz, a to až do hladiny 120 dB. U železničního provozu byly při studii naměřeny hodnoty i přes 120 dB. Při používání vrtulníků, letadel, ponorek a raket vzniká hladina až 145 dB. Infrazvuk o nejvyšších hodnotách bývá produkován velkými čerpadly, těžkými rotačními stroji a vzduchovými kompresory. V dnešní době je velmi diskutovaným tématem také vznik infrazvuku u větrných elektráren. V infrazvukové oblasti není doposud známa žádná studie, která by potvrdila překročení kritérií. Většina odborníků se shoduje, že infrazvuk u větrných elektráren není problém, avšak stále dochází k dalším studiím v této oblasti. Infrazvukový a nízkofrekvenční hluk byl měřen u elektráren ve Velké Británii. Výsledky překračující hodnoty směrné křivky byly naměřeny pouze u 5 větrných parků ze 126. Tento jev je tedy nepříliš četný, ale možný. Většinou indikuje nějaké technické závady. Výsledky měření v ČR se shodují s těmito závěry.

[22], [23], [25], [26], [27], [28]

4.2 Vnímání infrazvuku sluchovým ústrojím člověka

Definice infrazvuku, kdy se jedná o zvukové vlnění o frekvenci, kterou ontologicky slyšící člověk není schopen zaregistrovat, neodpovídá zcela realitě. Zvukové vlnění může být slyšitelné i při frekvencích

pod udávanými 20 Hz, musí ale působit v dostatečně vysoké intenzitě. K testování prahu slyšitelnosti byly používány také akustické komory, ve kterých byl práh slyšitelnosti snížen až na frekvenci 4 Hz při hladině akustického tlaku 107 dB. Dále byly použity sluchátka a naměřily se výsledky, kdy práh slyšitelnosti byl ve frekvenci 1,5 Hz při hladině akustického tlaku 131 dB. Z těchto výsledků lze vyvodit, že slyšitelnost infrazvuku závisí zejména na hladině akustického tlaku. Jestliže infrazvukové vlny mají dostatečně vysokou hladinu akustického tlaku, pak mohou být zaznamenány sluchovým ústrojím a vytvářet sluchový vjem.

Infrazvukové vlnění je vytvářeno vnějšími zdroji a vstupuje do sluchového ústrojí přes řetězec sluchových kůstek. Lidské tělo má i tzv. vnitřní zdroje infrazvuku, které jej generují např. při srdeční činnosti, dýchání nebo kašli.

[14], [15], [20], [23]

5. Měření zvuku (hluku)

Měření nízkofrekvenčního zvuku, zejména infrazvuku není v praxi vůbec jednoduchou záležitostí, a to z následujících důvodů:

- pro měření infrazvuku nelze použít konvenčně používané vybavení při měření zvuku,
- velmi obtížné je lokalizovat zdroj nízkofrekvenčního zvuku (infrazvuku),
- velmi obtížné je stanovit přítomnost infrazvuku v důsledku odlišné citlivosti jedince na zvuk o nízkých frekvencích.

Většina prováděných měření je zaměřena převážně na zjišťování úrovně hluku, což v praxi znamená měření hladiny akustického tlaku, intenzity či výkonu.

Pro měření zvukových hladin lze použít zařízení, které se nazývá zvukoměr (též hlukoměr). Některé zvukoměry umožňují i provádění vibračních měření, zásadním je pak doplněk – frekvenční analyzátor pracující v reálném čase.

[17], [29], [31], [32]

5.1 Zvukoměr (hlukoměr)

Zvukoměr je přístroj pro měření hluku, který je možné popsat jako elektronické zařízení, které reaguje na zvuk podobně jako lidský sluch. S jeho pomocí je možné objektivně a opakovatelně měřit jeho hladiny.

Obecně je zvukoměr kombinací:

- mikrofonu,
- signálového procesoru,
- detektoru,
- zobrazovacího zařízení.

Zvukoměr může být zkonstruován jako samostatný ruční přístroj s připojeným mikrofonom a vestavěným zobrazovacím zařízením. Může se také skládat z oddělených součástí umístěných v jedné, nebo ve více jednotkách a může být schopen zobrazovat rozmanité úrovně akustického signálu. Zvukoměry mohou obsahovat rozsáhlé zpracování analogového nebo digitálního signálu, a to samostatně nebo v kombinaci s více analogovými nebo digitálními výstupy. Součástí zvukoměrů mohou být víceúčelové počítače, zapisovače, tiskárny a další zařízení, která tvoří nezbytnou součást úplného přístroje.

Zvukoměry mohou sloužit pro používání za přítomnosti obsluhy, nebo k automatickým a trvalým měření hladin akustického tlaku prováděného bez obsluhy.

Druhy zvukoměrů:

- **konvenční zvukoměr** měřící exponenciálně časově vážené hladiny akustického tlaku,
- **integrující-průměrující zvukoměr** měří ekvivalentní hladiny akustického tlaku,
- **integrující zvukoměr**, který měří hladiny zvukové expozice.

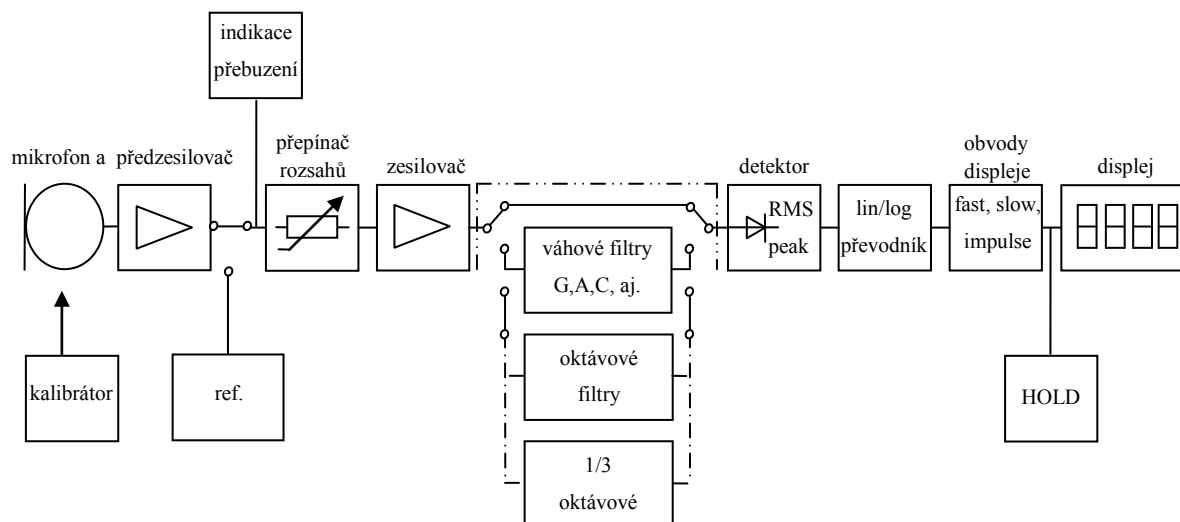
Jednotlivé zvukoměry mohou sloužit pouze pro jednotlivé nebo všechny tři druhy měření. Požadavky na výše uvedené zvukoměry specifikuje norma ČSN EN 61672-1.

Mezi referenční podmínky prostředí ke specifikování provozních vlastností zvukoměru patří:

- teplota vzduchu 23 °C,
- statický tlak 101,325 kPa,
- relativní vlhkost vzduchu 50 %.

Zjednodušené blokové schéma zvukoměru uvádí následující **obrázek 3**.

[6], [9], [10], [13], [17], [18], [29], [30], [31], [32], [33], [34]



Obrázek 3: Zjednodušené blokové schéma zvukoměru [17], [19], [33].

Základní částí každého zvukoměru je **mikrofon**, tedy zařízení, které mění akustický tlak na elektrický signál (z toho vyplývá i název elektroakustický měnič). Nejčastěji používaný typ mikrofónu je kondenzátorový, který je uveden na **obrázku 4**. Ten pracuje tak, že akustické vlny způsobující změny

tlaku, rozpohybují tenkou kovovou membránou, která představuje pohyblivou elektrodu. Membrána je napnuta před pevnou, většinou perforovanou elektrodou. Tyto dvě elektrody tvoří deskový kondenzátor. Vzdálenost mezi elektrodami se pohybuje kolem 10 μm . Rozpohybování membrány způsobuje změnu vzdálenosti mezi elektrodami, a tedy i změny kapacity kondenzátoru. Změnu kapacity převedeme na změnu elektrického napětí připojením polarizačního napětí. Tento signál je dále veden k předzesilovači.



Obrázek 4: Kondenzátorový mikrofon a jeho konstrukce [10], [35].

Zvukoměry mohou obsahovat jeden, dva nebo i více nezávislých kanálů, tedy i více mikrofonních vstupů.

Mikrofony se liší zejména ve své velikosti. Základním rozměrem, kterým lze charakterizovat mikrofon, je jeho vnější průměr, který je uváděn převážně v anglických palcích - 1", 1/2", 1/4", 1/8". S velikostí mikrofonu je úzce spojena také i horní mezní frekvence, pro kterou je mikrofon ještě možné použít. Obecně lze říci, že čím menší průměr mikrofonu bude při měření použit, tím bude možné měřit vyšší frekvence. Kupříkladu mikrofony vnějšího průměru 1/2" (12,7 mm) velikostí odpovídají vlnové délce zvuku při 26,9 kHz. Při měření zvuku mikrofonom 1/2" dochází na této frekvenci k maximálnímu zvýšení tlaku na přední části membrány mikrofonu. Velikost mikrofonu zároveň souvisí s jeho citlivostí, přičemž větší mikrofon je zpravidla citlivější a má větší dynamický rozsah. Dolní mezní frekvence mikrofonu je dána jeho vlastním tlakově vyrovnávacím systémem, který umožňuje vyrovnávání vnitřního tlaku mikrofonu s tlakem okolního prostředí. Vyrovnávání musí být pomalé, aby se zabránilo nepřesnostem při měření dynamických signálů. Dolní mezní kmitočet je určen také kapacitou mikrofonu. Například mikrofony o kapacitě 17 pF umožňují elektrické měření zvukových signálů o frekvencích až do 2,7 Hz. Mikrofony jsou určeny pro měření hladin v určitém rozsahu, dynamickém rozsahu. Při měření zvyšujících se hladin akustického tlaku dochází k stále většímu vychylování membrány, až do doby, kdy se membrána dostane do kontaktu se

zadní stranou mikrofonu. Hladina, na které tento jev nastal, je pak maximální hladinou akustického tlaku, kterou je možné naměřit.

Nejslabším signálem, jehož hladinu akustického tlaku lze změřit, je termální šum (termální pohyb molekul vzduchem). Při jeho měření generuje mikrofon na výstupu velmi slabý signál (cca 5 μV), který se rovná jakési zdánlivé hladině akustického tlaku, kterou lze vypočítat podle citlivosti daného mikrofonu. Pro mikrofony s různou citlivostí bude výsledná zdánlivá hladina odlišná.

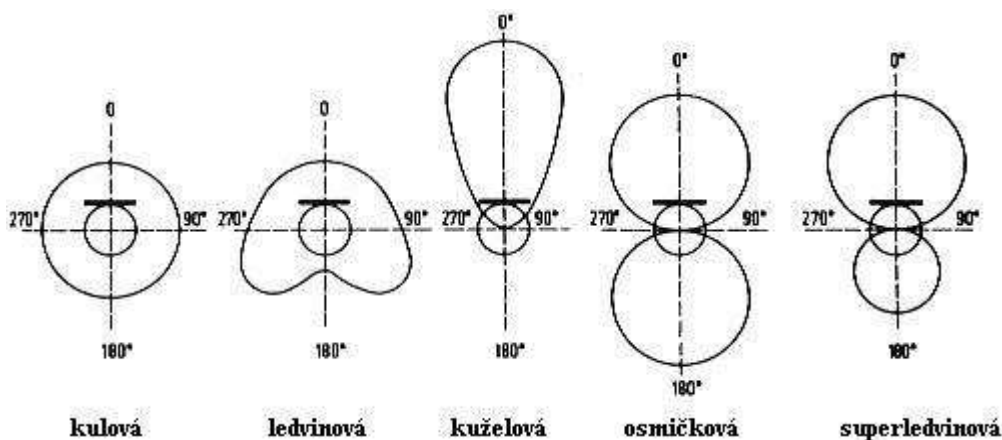
Kondenzátorové mikrofony lze, vzhledem k připojení k polarizačnímu napětí, rozdělit do dvou skupin:

- předpolarizované,
- nepředpolarizované.

Předpolarizované mikrofony nevyžadují externí zdroj polarizačního napětí. Tento typ mikrofonů se připojuje na předzesilovače napájené konstantním napájecím napětím (proudem) a je výhodný zejména pro ruční přístroje, jako je například měřič hladiny akustického tlaku, kde by nepředpolarizovaný typ byl značně nepohodlný.

Na **nepředpolarizované mikrofony** naproti tomu musí být externě přivedeno polarizační napětí 200 V. Připojují se na standardní předzesilovače, které jsou napojovány na napájecí modul, nebo na vstup analyzátoru. Tím je možné dodávat předzesilovači jak napájecí napětí (proud), tak polarizační napětí 200 V. V případě, že napájecí zdroj má menší napětí, schopnost přenosu přes dlouhé kabely se sníží, v důsledku toho je snížena horní frekvence. V případě, že je napájecí napětí nižší, dojde k ovlivnění horního dynamického rozsahu.

Důležitou vlastností mikrofonu je jeho **směrová charakteristika**. Ta popisuje s jakou citlivostí mikrofon snímá zvuky přicházející v ose a mimo osu mikrofonu. Osa rotačně symetrických mikrofonů bývá stejná s jejich geometrickou osou. Snímané zvuky jsou zaznamenávány do tzv. kruhového diagramu. Ukázky typů frekvenčních charakteristik jsou uvedeny na **obrázku 5**.



Obrázek 5: Směrové charakteristiky mikrofonu [5].

Mezi další důležité parametry patří zejména **frekvenční charakteristika** a **citlivost**. Frekvenční charakteristika znázorňuje citlivost mikrofonu pro zvuk přicházející zepředu v ose mikrofonu pro různé frekvence. Citlivost mikrofonu je rovna poměru výstupního napětí mikrofonu a akustického tlaku, který toto napětí vybudil. Udává se v jednotkách $\text{mV} \cdot \text{Pa}^{-1}$ a jedná se o frekvenčně závislou veličinu.

[6], [9], [13], [17], [18], [19], [30], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40]

Jak již bylo uvedeno, další součástí zvukoměru je **předzesilovač**. Kondenzátorové mikrofony mají konstantní nábojovou citlivost, pokud se kapacita soustavy zvyšuje. Například zavedením dlouhých kabelů mezi mikrofon a předzesilovač se napětí snižuje. To je důvodem, proč se napěťový předzesilovač umisťuje v bezprostřední blízkosti za mikrofonem. Tím je minimalizována kapacitance a nedochází k redukování citlivosti soustavy. Předzesilovač také může být přímo součástí těla mikrofonu.

Pro předzesilovač je typický velký vstupní odpor (řádově v giga ohmech). To vede k převodu vysokoimpedančního signálu na signál nízkoimpedanční, který se již může dále zpracovávat. Tato změna impedance signálu umožňuje další propojení předzesilovače s měřicím zařízením skrze dlouhé kabely, aby nedocházelo ke zkreslení či dalšímu znehodnocení signálu.

Přivedením polarizačního napětí je dosaženo konstantního náboje na kondenzátoru, což vede k tomu, že změny kapacity jsou převáděny na změny napětí.

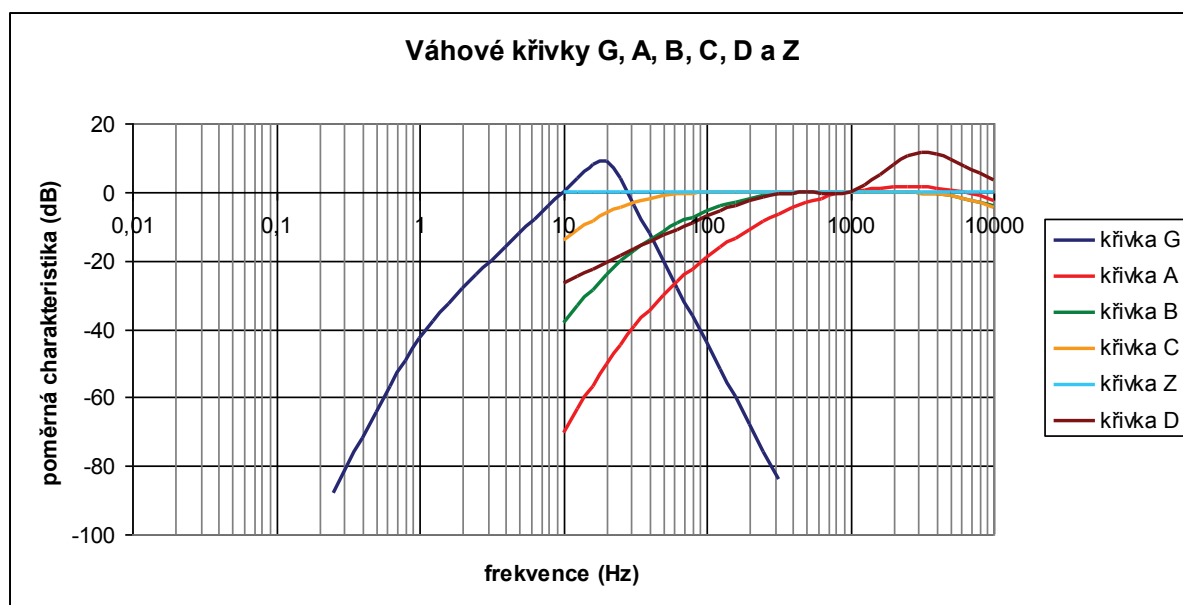
[13], [17], [18], [30], [33], [34], [35], [36]

Zvukoměr musí obsahovat obvod signalizace (indikátor) přebuzení indukující signály, které přesahují nejvyšší odečitatelnou hodnotu na výstupu o 12 dB u přesných, a o 10 dB běžných zvukoměrů, přičemž signál na výstupu je stále správný. Přepínač rozsahů měřitelných hladin je další ochranou přístroje před nadměrnou expozicí hluku. Volba vhodného rozsahu bývá provedena manuálně obsluhou, anebo si vhodný rozsah volí přístroj automaticky. Zvukoměry dále obsahují další zesilovače k zesílení signálu.

[17], [19], [33], [34]

Nezbytnou součástí hlukoměrné techniky jsou váhové, oktávové, třetinooktávové filtry, a další selektivní filtry či pásmové propusti. Váhové filtry, které jsou zabudované v moderních zvukoměrech, upravují hodnotu signálu pro specifická frekvenční pásma. Používají se k přepočítávání skutečně naměřených hodnot hladin zvuku na jiné hodnoty hladin zvuku, z důvodu zkreslené citlivosti lidského

sluchu při různých kmitočtech, jinými slovy se snaží, aby mikrofon fungoval ve všech frekvencích jako lidské ucho. Svou konstrukcí se jedná o relativně jednoduchá zařízení, která jsou vytvořená pomocí RLC obvodů. Váhové filtry upravují zaznamenaný signál podle předem zadaných frekvenčních charakteristik, které jsou zobrazeny na **obrázku 6**.



Obrázek 6: Frekvenční váhové křivky [21], [33].

Váhové filtry a jejich charakteristiky se označují velkými písmeny, a to konkrétně A, B, C, D, Z a G. Filtry B a D se dnes již nevyužívají. Průběhy filtrů A a C jsou mezinárodně definovány v rozsahu kmitočtů od 10 Hz do 20000 Hz. Váhový filtr A bývá standardní součástí každého zvukoměru, pokrývá frekvenční rozsah slyšitelného zvuku a potlačuje ostatní frekvence mimo tento rozsah. Měření hladin s tímto filtrem se značí v jednotkách dBA. Váhový filtr Z je lineární. Jedná se tedy o frekvenčně nevážený signál a je možné ho použít pro infrazvuková a nízkofrekvenční měření. Poslední ze zmíněných je filtr G. Ten je využíván pro určování vážených hladin akustického tlaku zvuku nebo hluku, jehož spektrum leží částečně nebo zcela ve frekvenčním pásmu 1 Hz až 20 Hz. Při měření širokopásmových hluků, jejichž spektrum zahrnuje jak rozsah infrazvuku, tak rozsah slyšitelných frekvencí, představuje určení vážené hladiny akustického tlaku infrazvuku doplněk k popisu stejného hluku, avšak jen z hlediska rozsahu slyšitelných frekvencí (například vyjádření ve tvaru hladiny akustického tlaku A). Číselná hodnota výsledku se bude obecně lišit od výsledku vážení funkcí G. Tomuto rozdílu není nutné přikládat žádný význam, neboť tyto výsledky platí pro různé, jen mírně se překrývající části spektra hluku.

Z definice váhové křivky G vyplývá, že má zisk 0 dB na 10 Hz, tedy hladina akustického tlaku G čistého tónu je stejná jako nevážená hladina akustického tlaku. V rozmezí od 1 Hz do 20 Hz se křivka aproximuje úsečkou se sklonem 12 dB na oktávu. Tímto způsobem se každá frekvence váží podle jejího poměrného příspěvku k vnímání. Pod 1 Hz a nad 20 Hz je křivka klesající se sklonem 24 dB na oktávu.

Vážení funkcí G je možné také využít při určování hladin akustického tlaku, výkonu a intenzity. Při měření za použití křivky G se tyto veličiny označují L_{pG} , L_{WG} a L_{IG} .

Pro měření infrazvuků a nízkofrekvenčních zvuků je možné také využít váhový filtr A spolu s filtrem C. To je umožněno tím, že filtr A filtruje podstatně víc nízkofrekvenční složky než filtr C. Z toho vyplývá, že pokud se naměřené hodnoty vážení A a C jen minimálně odlišují, pak zdroj neprodukuje nízkofrekvenční zvuky. Je-li tomu naopak a rozdíl je velký, je indikován významný zdroj nízkofrekvenčního zvuku.

Výběr váhových filtrů je zejména pro měření infrazvukových a nízkých frekvencí klíčový. Při zvolení špatného filtru, již není možné po dokončení měření, převést naměřené hodnoty s daným váhovým filtrem na hodnoty odpovídající jinému váhovému filtru. Nejpřesnějších výsledků měření v této oblasti je dosaženo volbou váhového filtru G, který je určen přímo pro tuto frekvenční oblast. Zvolení filtru A by vedlo k potlačení těchto frekvencí.

Váhové filtry mohou být přímo součástí přístroje, nebo připojeny externě. Moderní zvukoměry většinou poskytují možnost měřit s použitím více váhových filtrů najednou. Což znamená velkou výhodu, zejména při výběru špatného filtru.

[17], [19], [21], [30], [31], [34]

U **oktávových filtrů** dochází k rozdělení frekvenčního spektra na oktávová pásma. Rozdělení je výhodné, protože měřit hladinu akustického tlaku pro každou frekvenci je nepraktické. Oktáva je frekvenční pásmo, kde horní hraniční frekvence je dvojnásobkem dolní hraniční frekvence. Hladiny v oktávových frekvenčních pásmech se využívají zejména pro frekvenční posouzení charakteru zdroje hluku s ohledem na člověka. Oktávová hladina akustického tlaku je rovna naměřené efektivní hodnotě tlaku uvnitř oktávového pásma. Časté je zlomkové dělení oktáv (nejčastěji na třetiny), které umožňuje získat přesnější informace o zdroji hluku. U třetinooktávového pásma je poměr horní a dolní hraniční frekvence roven $\sqrt[3]{2}$, tedy 1,26. Na **obrázku 7** je ukázka rozdílu mezi oktávovou a třetinooktávovou analýzou hluku vysoušeče vlasů.

[16], [17], [18], [33], [34]



Obrázek 7: Oktávová a třetinooktávová analýza hluku vysoušeče vlasů [18].

Selektivní filtry upravují signál pomocí integrální frekvenční charakteristiky ve specifikované frekvenční oblasti nebo v celém frekvenčním rozsahu.

Výsledné hodnoty se dají zjistit ze **zobrazovací jednotky**. Většinou se jedná o digitální displej, který nám ukazuje naměřené hodnoty hladiny akustického tlaku a dalších hodnot, které je možné daným zvukoměrem měřit. Další možností je uložení dat získaných měření, které se následně zobrazí pomocí vhodného zařízení, zejména prostřednictvím počítače, který je vybaven příslušným softwarem k zobrazení a vyhodnocení dat.

Zobrazovací rychlost displeje na změny signálu je určena vlastnostmi přístroje. Tyto vlastnosti určují časovou konstantu, podle které je hladina akustického tlaku časově vážena. Mezi konkrétní časové konstanty patří:

- rychlá – označována písmenem F (z anglického fast), o čase 0,125 s,
- pomalá – označována písmenem S (z anglického slow); o čase 1 s,
- impulsní – označována písmenem I (z anglického Impulse).

[17], [30], [33], [34]

Aby hodnoty zobrazené na displeji, odpovídaly přesné hladině akustického tlaku v místě měřícího mikrofону, je nutné zvukoměr zkalibrovat.

Základem správné kalibrace je vhodně zvolený kalibrátor. Celý měřicí systém, od mikrofónu až po zobrazovací indikátor, by měl být kalibrován na frekvencích pro sinusové vstupy ve frekvenčním rozsahu nejméně od 0,5 Hz do 160 Hz, přednostně v rozsahu od 0,25 Hz až 315 Hz.

Zesílení systému by se mělo nastavit tak, aby pro vstupní signál s frekvencí 10 Hz indikátor udával správnou hladinu akustického tlaku v decibelech vztaženou k 20 μPa .

Kalibrace by se měla provádět v rozsahu linearitu měřicího systému na hladině srovnatelné s hladinou hluku, který se má přístrojem měřit.

Kalibrace může být částečně akusticko-elektrická a částečně elektrická za předpokladů, že se tím nesníží její přesnost.

[17], [18], [37], [39]

5.2 Frekvenční analýza infrazvukového signálu

Prostřednictvím frekvenční analýzy infrazvukového signálu lze získat důležité informace o frekvenčním složení infrazvuku. Používá se pro podrobnější rozbor měřeného signálu. Frekvence obsažené v signálu jsou zobrazovány s hodnotami akustických hladin, na nichž se vyskytují. Výsledkem analýzy je spojité frekvenční spektrum.

Infrazvuky jsou v současné době analyzovány za pomoci zvukoměrů, které jsou doplněny obvody pro frekvenční analýzu zvuku. Jsou vhodné převážně pro uměle vytvořené infrazvuky s frekvenční oblastí nad 2 Hz. Nelze je využít u většiny přírodně se vyskytujících infrazvuků pro frekvenční oblast, která se pohybuje v rozmezí od 0,001 do 2 Hz.

[7], [41]

5.3 Měření hladin akustické intenzity

Akustická intenzita poskytuje informaci o směru toků akustické energie, jenž se využívá pro lokalizaci zdrojů zvuku.

Měření infrazvukových frekvencí je velmi obtížné a závisí na kvalitě použitých mikrofonů.

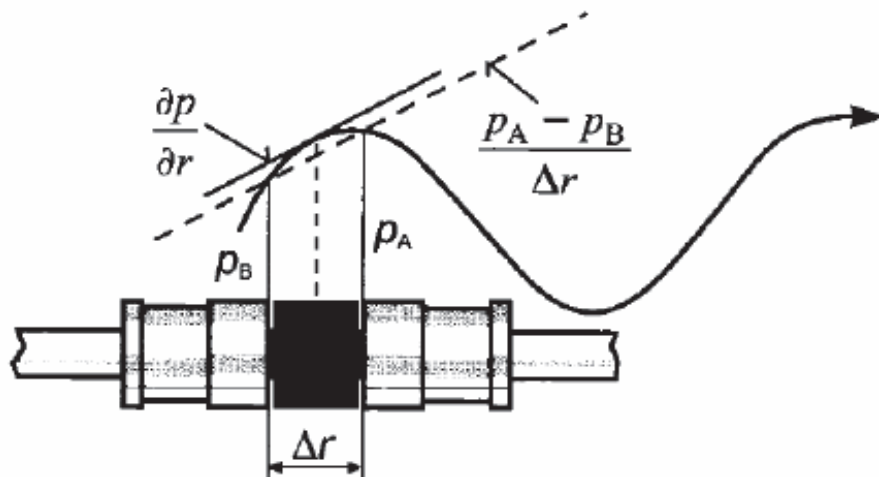
V akustice je nejčastěji měřen akustický tlak, akustický výkon a intenzita zvuku, tedy jejich hladiny. Kromě měřené veličiny je možné členění podle jiných kritérií, zda se jedná o měření uzavřených prostorů nebo zvukových zdrojů, nebo také podle měření širokopásmového nebo úzkopásmového.

Nejjednodušší je měření hladiny akustického tlaku, který je nezávislý na frekvenci. Hladinou akustického tlaku je popsána hodnota akustického tlaku v daném místě, kde je umístěno detekující zařízení, nebo kde se nachází exponovaná osoba. Jednoduchost měření akustického tlaku spočívá v tom, že měřená veličina je skalár, tedy hodnota akustického tlaku.

Akustickou intenzitou je popisován směr toků akustické energie. Jedná se tedy o vektorovou veličinu. Měření se nejčastěji provádí v normálovém směru k jednotkové měřicí ploše, kterou akustická energie

protéká. Pomocí měření akustické intenzity se nejčastěji určují zdroje hluku v prostoru. Také je využívána při měření akustického výkonu.

Akustická intenzita se nejčastěji měří pomocí intenzitní sondy (**obrázek 8**).



Obrázek 8: Intenzitní sonda pro měření akustické intenzity [11].

Sonda je složena ze dvou mikrofónů, které jsou nejčastěji nasměrované proti sobě. Prostor mezi mikrofony je vyplněn rozpěrnou vložkou, kterou se určuje vzdálenost mezi mikrofony, a tím se i nastavuje rozsah měřených frekvencí.

Obecně je možné říci, že čím jsou měřeny nižší frekvence, tím větší je vzdálenost mezi mikrofony. Tímto zařízením je měřen gradient tlaku, který je úměrný rychlosti.

Vzorec pro výpočet intenzity zvuku:

$$I = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p \cdot v_r dt, \quad (5)$$

kde:

v_r - akustická rychlost částic, která je dána vztahem:

$$v_r = \frac{1}{\rho} \cdot \int_0^T \frac{\partial p}{\partial r} dt \approx \frac{1}{\rho} \cdot \int_0^T \frac{(p_B - p_A)}{\Delta r} dt \approx \frac{1}{\rho \cdot \Delta r} \cdot \int_0^T (p_B - p_A) dt, \quad (6)$$

kde:

p - akustický tlak vypočítaný podle:

$$p \approx \frac{p_A + p_B}{2}. \quad (7)$$

Z naměřených tlaků je možné výslednou intenzitu vypočítat takto:

$$I = \frac{p_A + p_B}{2 \cdot \rho \cdot \Delta r} \cdot \int_0^T (p_A - p_B) dt. \quad (8)$$

Intenzitní sondou není měřen skutečný vektor akustické intenzity, ale pouze její složka ve směru osy mikrofonů. Pro určení vektoru akustické intenzity je nutné provést měření ve třech na sebe kolmých směrech a z výsledků měření následně vyhodnotit výsledný vektor. Z toho vyplývá, že tato sonda je směrově citlivá. Pokud je sonda nasměrována přímo ke zdroji hluku, pak má maximální citlivost, a pokud je nasměrována kolmo ke zdroji, intenzita je nulová. Právě tento princip se využívá při výše zmíněném určování zdroje hluku. Je-li změřená intenzita nulová, pak je sonda orientována kolmo na zdroj hluku.

[1], [4], [6], [9], [11]

5.4 Měření hladin akustického výkonu

Měření akustického výkonu je jedním ze základních měření v akustice. Akustický výkon je nejdůležitější charakteristikou zdrojů zvuku, která umožňuje srovnávání zdrojů navzájem a jejich hodnocení.

Akustický výkon lze měřit dvěma základními způsoby:

1. Pomocí akustického tlaku
 - v anechoické komoře (ve volném poli)
 - v dozvukové komoře (v difuzním poli)
2. Pomocí akustické intenzity

[1], [4], [6], [9], [11], [17], [18]

5.4.1 Měření ve volném poli

Při měření ve volném poli se kolem zdroje hluku vytvoří fiktivní půlkulová měřicí síť, v jejíchž uzlových bodech se provádí jednotlivá dílčí měření akustického tlaku. Vyzařovaný akustický výkon je pak dán vztahem:

$$L_w = L + 10 \cdot \log \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot R}{S_0} \right) + C, \quad (9)$$

kde:

L – hodnota hladiny akustického tlaku přes všechny měřicí body,

R – poloměr půlkulové sítě,

S_0 – referenční plocha rovna 1 m^2 ,

C – korekce na atmosférické podmínky.

Anechoická komora je pro většinu praktických měření nedostupná, proto se využívá tzv. inženýrská metoda, která považuje příspěvek odrážejícího pole k akustickým tlakům za nepodstatný. Měřicí síť může být půlkulová i kvádr. Aby měření bylo s dostatečnou přesností, je třeba nejprve vyhodnotit součinitele absorpce místnosti A a povrch místnosti S , ve které se měření provádí. Celková pohltivost místnosti je dána vztahem:

$$A = 0,16 \cdot \left(\frac{V}{T} \right), \quad (10)$$

kde:

V - objem místnosti,

T - čas dozvuku místnosti.

Aby měření bylo s uspokojivou přesností, musí být poměr A/S větší než 6. Čím větší číslo, tím je daný prostor vhodnější pro dané měření. Výsledná hladina akustického výkonu zdroje pak je:

$$L_w = L - K + 10 \cdot \log \frac{S}{S_0}, \quad (11)$$

kde:

K - korekční součinitel, získaný podílem A/S ,

S – sledovaná plocha.

[1], [4], [6], [9], [11], [17], [18]

5.4.2 Měření v difuzním poli

Měření se provádí v dozvukových komorách, jejichž konstrukce je levnější než u anechoických komor. Pro zajištění dozvukového pole vhodného pro tento typ měření by měl střední koeficient akustické absorpce pro všechny povrchy být menší než 0,06. Akustický zdroj je vhodné umístit blízko rohů místnosti a nejméně 1,5 m od kterékoli stěny. Výsledná hladina akustického výkonu závisí na povrchu a objemu místnosti, době dozvuku místnosti, tlaku v místnosti a délce vlny na střední frekvenci pásma.

5.4.3 Měření pomocí akustické intenzity

V praxi nebývá prostředí, v němž se měří, ani dozvukové ani bezdozvukové. Nelze se proto vyhnout odrazům zvuků a zvuků pozadí. Vhodnější je měření akustického výkonu pomocí akustické intenzity na uzavřené měřicí ploše kolem zdroje hluku. Prakticky se provádí měření vytvořením uzavřené plochy obklopující měřený zdroj hluku. Pokud je tato plocha mimo zdroj hluku, pak následující integrál je nulový:

$$W = \oint_S I \cdot dS . \quad (12)$$

kde:

I - intenzita zvuku,

S – sledovaná plocha.

Hladina akustického výkonu je pak dána vztahem:

$$L_W = 10 \cdot \log \frac{W}{W_0} . \quad (13)$$

5.5 Měření vibrací

Vibrace bývají doprovázeny zvuky a infrazvuky, které jsou pro lidský organismus nepříjemné a mohou způsobovat jeho poškození.

Většina vibračních signálů je složena z velkého množství frekvencí, jejichž přesné složení je možné získat frekvenční analýzou a vyskytuje se převážně v průmyslovém provozu. Frekvenční analýza je základem vibračních měření, při nichž lze získat frekvenční spektrogram. Frekvenční spektrogram je grafem znázorňujícím hladiny vibrací v závislosti na frekvencích obsažených v signálu.

Důležitou charakteristikou vibrací je jejich amplituda, která svědčí o závažnosti existujících vibrací. Amplitudu vibračního signálu lze vyhodnotit několika způsoby:

- úroveň špička – špička pro indikaci maximálních hodnot vibrací,
- úroveň špičkovou – pro indikaci úrovně krátkodobých otřesů,
- úroveň střední hodnoty – pro indikaci úrovně v čase (udává méně přesnou hodnotu),
- úroveň efektivní hodnoty – pro indikaci úrovně v čase (udává přesnější hodnotu).

Nejčastěji používaná je úroveň efektivní hodnoty, která vypočítává výslednou hodnotu s ohledem na časový průběh vibračního signálu i na jeho energetický obsah.

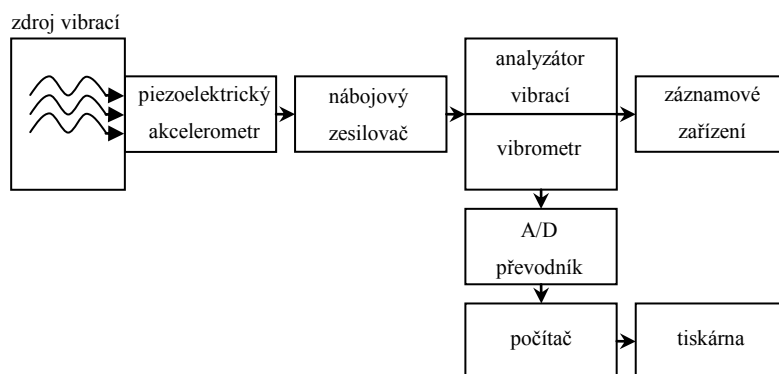
Vibrace lze také charakterizovat těmito základními parametry:

- zrychlení
- rychlost
- posun.

Hlavní rozdíl mezi výše uvedenými parametry je ve vzájemném fázovém posunu zobrazovaných křivek, které charakterizují závislost amplitud těchto veličin na čase.

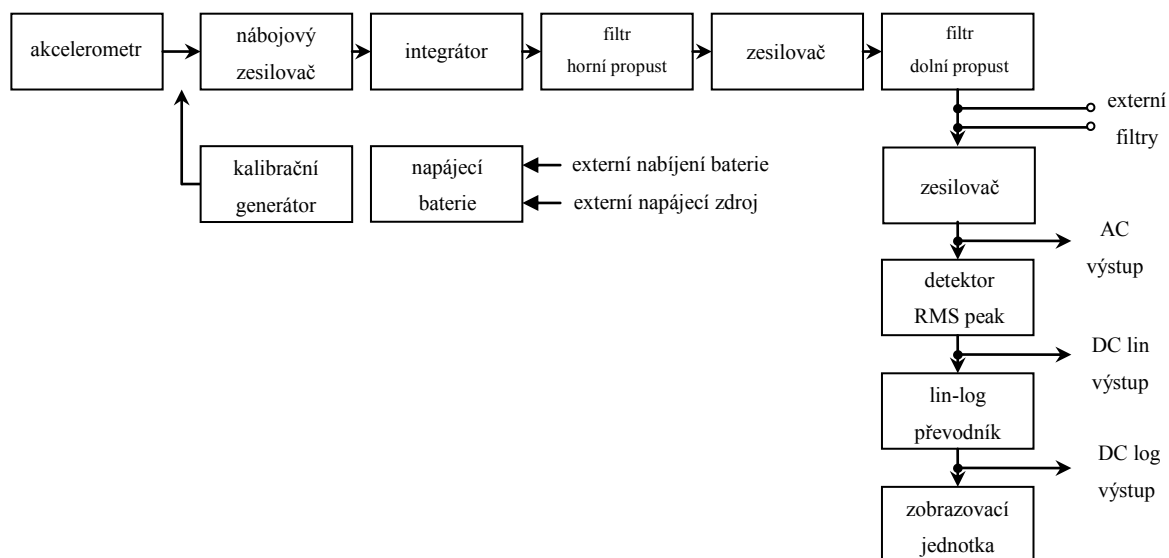
K měření vibrací jsou využívány vibrometry, což jsou přístroje umožňující měření výše uvedených základních parametrů. Pro měření vibrací způsobených infrazvukem (jeho vlněním) se volí jako měřicí parametr posun, který je více závislý na nízkých frekvencích. Naopak u signálu obsahujících vyšší frekvenci se použije zrychlení.

Základním článkem přístrojů pro měření vibrací je snímač, který je schopen měřit signály v širokém frekvenčním a dynamickém rozsahu. Jedná se piezoelektrický akcelerometr, tedy aktivní snímač, který nevyžaduje žádný zdroj napájení. Jelikož při mechanickém namáhání, resp. vibracích generuje elektrický náboj úměrný působící síle (zrychlení). Blokové schéma možného řešení systému pro měření a analýzu vibrací je uvedeno na **obrázku 9**.



Obrázek 9: Blokové schéma systému pro měření a analýzu vibrací [43], [44].

Moderní vibrometry mají ke vstupu připojen akcelerometr s nábojovým zesilovačem. Zjednodušené blokové schéma takového vibrometru je uvedeno na **obrázku 10**.



Obrázek 10: Zjednodušené blokové schéma konstrukce vibrometru [43].

Vibrace se mohou na člověka přenášet buď přímo ze zdrojů vibrací nebo prostřednictvím dalších zařízení či médií. Vibrace se nejčastěji přenášejí přes oblast hýždí nebo nohou nebo pak vibrace působící na soustavu ruka-paže, které do těla prostupují skrz prsty a dlaně.

[16], [17], [18], [19], [42], [43], [44]

5.6 Další zařízení pro měření infrazvuku

K měření infrazvuku (infrazukových vln) lze využít i **seismografy**, což jsou přístroje pro měření seizmických vln vznikajících při tektonických zemětřeseních, sopečných činnostech, odstřelech v kamenolomech. Citlivé seismografy jsou kromě výše uvedených jevů schopny zaznamenávat neustálé slabé pohyby zemského povrchu (seizmický neklid), jehož frekvenční pásmo se pohybuje v rozmezí 0,0001 Hz do 10 Hz.

Seismografy se skládají ze seismometru, který obsahuje elektronické obvody pro zpracování seizmických signálů a z analogového, nebo digitálního záznamového zařízení.

K detekci infrazukových vln lze dále použít **mikrobarografy a mikrobarometry**, což jsou přístroje používané k měření nízkých úrovní akustického tlaku.

Mikrobarograf je registrační přístroj zachycující měření změn tlaku v čase. Mikrobarometr je diferenční tlakový senzor, mikrofon s vysokou citlivostí optimalizovaný pro měření při velmi nízkých frekvencích.

[47], [47], [49]

5.7 Obecná pravidla při měření zvuku (hluku)

- Pro zajištění objektivitu měření je nutné měření hluku provádět za určitých podmínek. Hluk například nelze měřit za nepříznivého počasí, jakým je silný vítr, déšť nebo sněžení. Hluk způsobený dopravními prostředky se musí měřit v den s obvyklou mírou dopravy, tedy ve všední dny a nikoli o víkendu.
- Hluk se obvykle měří buď celých 24 hodin, nebo se měří jen v některé časové úseky a zbylé jsou dopočítávány. Venkovní hluk se měří ve vzdálenosti dvou metrů od fasády domu.
- Pro orientační měření je možné použít ruční hlukoměr. Výsledky orientačního měření však nelze použít jako důkazní materiál pro úřady a soudy.
- V interiéru budov se měřicí místo volí přednostně 1,2 až 1,5 m nad podlahou, přičemž mikrofon se směřuje ke zdroji (se zvukoměrem nastaveným na čelní úhel dopadu), nebo svisle vzhůru (se zvukoměrem nastaveným na náhodný úhel dopadu).
- Hladina měřeného signálu musí být minimálně o 3 dB vyšší než hladina hluku pozadí, tzn. že hluk pozadí nesmí zcela maskovat měřený zvuk či hluk.

[50]

6. Vliv infrazvuku a nízkofrekvenčního hluku na lidský organismus

Všeobecně lze nepříznivé účinky hluku na lidské zdraví definovat jako morfologické nebo funkční změny organismu, které vedou ke zhoršení nebo poškození jeho funkcí, ke snížení odolnosti organismu na stres nebo zvýšení vnímavosti na nepříznivé vlivy prostředí.

Na hluk je potřeba pohlížet nejen z hlediska celého spektra atakovaných funkcí, ale i z hlediska fyzikálních parametrů hluku, místa a času působení.

Účinky hluku o nízkých frekvencích na lidský organismus jsou popisovány jako všeobecná rozladěnost, nevolnost, dezorientace, zvýšená unavitelnost, poruchy spánku nebo spavost a řada jiných kombinací nespecifikovaných příznaků.

Pokud se jedná o vliv infrazvuku a jeho účinky na člověka, tak je myšlen především uměle vytvořený infrazvuk produkovaný především dopravním ruchem a průmyslovým provozem.

Obecně je uváděno, že hladiny nízkofrekvenčního zvuku a infrazvuku způsobují:

- okolo 170–180 dB smrtící účinky,
- okolo 160 dB pocity bolesti,
- okolo 120–150 dB působí destruktivně na buněčné struktury,
- hladiny pod 120 dB negativně působí na lidský organismus přímým vyvoláním rezonance vnitřních orgánů, to vede k pocitům bolesti, změně srdeční a dechové frekvence, a následně k pocitům nevolnosti s negativním odrazem na psychický stav,
- okolo 100–130 dB byly zjištěny poruchy rovnováhy, tlak ve středouší, zrakové ostrosti, změny činnosti enzymů v buňkách a změny bioelektrických vlastností tkání,
- kolem 90–100 dB způsobují pocity nepohody, rozladěnosti, bolesti hlavy, únavy, nevolnosti a další nepříznivé stavy,
- okolo 92 dB se nachází práh vnímání pro 16 Hz, který platí pro krátkodobý podnět, avšak při podnětu trvajícím desítky minut se práh slyšení postupně snižuje o 10 dB a více,
- okolo 80–100 dB jsou považovány jako neschopné vyvolat závažné zdravotní poškození, ovšem někteří lékaři usuzují, že po dlouhodobém působení infrazvuku mohou nastat změny funkcí i při těchto úrovních.

Stupně poškození způsobené infrazvukem vzhledem k hladině akustického tlaku shrnuje následující **tabulka 2.**

Tabulka 2: Stupně poškození způsobené infrazvukem vzhledem k hladině akustického tlaku [26].

Stupeň poškození	Hladina akustického tlaku (dB)	Účinek infrazvuku
I	>185	Roztrhání plicních sklípků.
II	145–172	Jedinec může vydržet 2 minuty.
III	120–140	Prodloužení reakční doby, obtížnější pro koncentraci.
IV	<120	Pocity únavy, nevolnost.

Při vnímání nízkofrekvenčního hluku dochází k několika zvláštnostem:

- **získání zvýšené citlivosti** – lidé se na tyto frekvence „naladí“ a dokáží je rozpoznat i při vysokém pozadí širokopásmového hluku,
- **paměťový efekt** – lidé si připadají, že hluk stále pocítují, pronásleduje a obtěžuje je, přestože jsou z dosahu zdroje hluku nebo je zdroj zvuku mimo provoz,
- **výrazná citlivost na fluktuace,**
- nízké frekvence **hůře snášejí ženy**, které jsou na nízkofrekvenční zvuk více citlivé než muži.

Negativní účinky hluky lze členit na:

- **specifické (auditivní)** – s účinkem na sluchový orgán. U expozice při hladině 120-130 dB může docházet k poškození bubínku a převodních kůstek středního ucha. Při dlouhodobé expozici nad 85 dB pak může docházet k poškození struktur vnitřního ucha,
- **nespecifické (extraauditivní, systémové, mimosluchové)** – s účinkem na různé funkce organismu. Reakce vegetativního a hormonálního systému.

Dále pak i na:

- **akutní účinky** (stres a tomu odpovídající obrana organismu):
 - poškození sluchového aparátu
 - zvýšení krevního tlaku
 - zrychlení tepové frekvence
 - stažení periferních cév
 - zvýšení hladiny adrenalinu
 - únava, deprese, rozmrzelost, agresivita, neochota
 - snížení výkonnosti, paměti a pozornosti

- **chronické účinky** (civilizační choroby):
 - fixace akutních účinků
 - ztráta sluchu
 - hypertenze
 - poškození srdce, infarkt myokardu
 - snížení imunity
 - pocit únavy, ovlivnění spánku, nespavost

Účinky infrazvuku jsou sledovány již několik desetiletí, přesto je počet experimentálních prací relativně nízký a studie, které by hodnotily dlouhodobé expozice v podmínkách životního (obytného) prostředí prakticky nejsou. Obecně nejsou k dispozici početnější exponované populace, které by umožnily provést epidemiologické studie vztahu dávka-účinek. Převážná většina výsledků byla získána po krátkodobém působení (v minutách, maximálně hodinách), a to v pracovním prostředí člověka. Laboratorní pokusy na lidech jsou pak omezeny problémy spojenými s generováním příslušného podnětu a přesným měřením expozic osob. Dalšími důležitými ukazateli, které je třeba zohlednit jsou frekvenční obsah, doba působení, impulsní charakter, kolísavost hladin nebo také denní a roční doba, fyzický, psychický a sociální stav exponovaných osob.

Za dostatečně prokázaný lze považovat vliv hluku na sluchový aparát, ovlivnění kardiovaskulárního, imunitního systému a poruchy spánku. Omezeny jsou důkazy působení na hormonální systém, biochemické funkce, fetální vývoj a mentální zdraví.

Světová zdravotnická organizace vychází při doporučení limitních hodnot hluku v životním (mimopracovním) prostředí ze současných poznatků o negativním účinku hluku na rušení spánku v noční době, na řečovou komunikaci, obtěžování, pocity nepohody a rozmrzelosti.

[14], [15], [17], [18], [19]

6.1 Závěry zveřejněných studií vlivu infrazvuku na lidské zdraví

Níže jsou uvedeny některé závěry uveřejněných studií infrazvuku a nízkofrekvenčního hluku na lidské zdraví.

V roce 2001 byla technickou univerzitou Lund ve Švédsku zveřejněna studie, týkající se obtěžujícího hluku generovaného při silniční dopravě. Dle této studie je hlavním zdrojem hluku v zastavěném městském prostředí právě silniční doprava. Hluk z dopravy se šíří přes zdi budov s okny orientovanými k silnici až do interiérů, kde negativně ovlivňuje člověka – detekovatelné vibrace nebo sluchové percepcie typu dunění či drnčení. Z hlediska frekvenčního složení hluku ze silničního provozu spadá velká část spektra do nízkých frekvencí, zejména kolem 60 Hz. Následkem jsou

rezonance hrudníku, či některých dalších částí lidského těla, kde se v závislosti na individuálních vlastnostech pohybuje rezonanční frekvence v rozmezí od 30 do 90 Hz. Uvádí se průměrná hodnota 74 Hz u mužů a 64 Hz u žen. Tento účinek je možné pozorovat nejen u osob uvnitř budov, ale také u chodců podél silnic.

Dále bylo zjištěno, že se u osob vystavených infrazvuku a nízkofrekvenčnímu hluku, mohou projevovat **poruchy spánku**, **narušení koncentrace** při vykonávání duševní práce a určitý **pocit nepohodlí**. Při zvýšení intenzity infrazvuku se pak u exponovaných osob objevují **závratě**, **psychická únava**, **podrážděnost**, **nausea**, **bolesti hlavy**, **ztráta rovnováhy** a také **stres**, jež může být příčinou dalších závažnějších zdravotních problémů. Účinky hluku však ve většině případů nejsou okamžité, ale postupně se kumulují, tudíž se negativně projeví až za delší dobu. Samozřejmě jsou velmi individuální a u některých osob lze dokonce pozorovat návyk na určitý typ hluku.

Další studie se pak zabývá mírou dopadu působení infrazvuku na člověka v závislosti na jeho výskytu při určité hladině akustického tlaku, ve které jsou působící hladiny akustického tlaku spolu s rozsahem poškození rozděleny na čtyři stupně (**tabulka 2** uvedena výše v **kapitole 6**).

Je zřejmé, že velmi intenzivní infrazvukové vlnění může vyvolat **vnitřní krvácení** a dokonce **smrt**, pokud je expozice déletrvající. Tyto extrémně vysoké hladiny se však vyskytují jen v laboratorních podmínkách a v každodenním prostředí jsou mimořádně vzácné.

Mezi prokazatelné účinky infrazvuku o vyšších hladinách akustického tlaku řadíme **rezonance vnitřních orgánů** nebo i **celého těla**. Tyto nastávají v případě, kdy se budící frekvence blíží vlastní frekvenci dané části lidského těla. Vliv tohoto vynuceného kmitání je závislý na způsobu jeho přenosu na lidské tělo a také na fyzikálních vlastnostech infrazvuku (amplituda, frekvence). Nejcitlivější je tělo na infrazvuková vlnění či vibrace v rozsahu 1 až 8 Hz. Infrazvuky o frekvencích mezi 0,01 až 5 Hz jsou zodpovědné za tzv. nemoci z pohybu neboli kinetózy. **Rezonanci žaludku** pak způsobují infrazvuky ve frekvenčním rozsahu 3 až 6 Hz. Důsledkem jsou nárazy žaludku do bránice, s čímž je spojeno rozkmitání proudu vdechovaného a vydechovaného vzduchu plícemi v rozsahu dané budící frekvence. Objevují se tak problémy při řečové komunikaci a zvýšení výšky hlasu v důsledku celkového zvětšení svalového napětí. Pozorovat lze třes hlasu, který je modulován touto frekvencí, až neschopnost plynulé mluvy.

Zvláště citlivá na infrazvukové frekvence okolo 8 Hz je pak mozková kůra (frekvence shodná s frekvencí alfa vln). Působením této infrazvukové frekvence dochází k ovlivnění morfologie elektrických biopotenciálů lidského mozku, přičemž jsou tyto změny patrné na EEG záznamu. U exponovaných osob se může projevit **neschopnost jasného myšlení** a **porucha koncentrace**. Rovněž infrazvukové vlnění při frekvenci od 1 do 90 Hz může ovlivnit schopnost vidění v důsledku **rezonance oka**.

Vliv nízkofrekvenčního hluku na lidský organismus v rozsahu 20 až 100 Hz, je dle výzkumů mnohem významnější než hluk o infrazvukových frekvencích.

Ve většině případů je přímé měření a hodnocení míry obtěžování hlukem dosti složité. A to z důvodu proměnných faktorů. Nikoliv jen fyzikálně měřitelných akustických proměnných. Důležitým aspektem při realizaci studií jsou také návrhy vhodných dotazovacích metod, které jsou následně aplikovány na zkoumané jedince.

S vlivem zvuku na člověka je také spojován pojem **psychoakustika**. Psychoakustika je vědním oborem, který se zabývá percepcí zvuku lidským mozkem. Poznatky z psychoakustiky jsou používány například v oblasti kontroly kvality zvuků u produktů (např. v automobilovém průmyslu), které musí splňovat určité vlastnosti, aby neměly na jedince negativní vliv. Zaváděny jsou akustické metriky jako ostrost (angl. *sharpness*), hlasitost (angl. *loudness*), drsnost (angl. *roughness*) nebo kolísavost (angl. *fluctuation strength*) zvuku.

[16], [18], [19], [22], [26], [51], [52], [53], [54], [55], [56], [57], [58]

7. Hygienické limity pro infrazvuková vlnění

Ochrana veřejného zdraví je v České republice řešena zákonem č.258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů, ve znění pozdějších předpisů. Hygienické limity pro hluk jsou stanoveny prováděcím právním předpisem k tomuto zákonu, tj. nařízením vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací.

Nařízení vlády uvádí pouze přípustný limit pro nízkofrekvenční zvuky a infrazvuky v pracovním prostředí, to pro osmihodinovou expozici. Expoziční limit je vyjádřen ekvivalentní hladinou akustického tlaku, váženou G funkcí a ekvivalentní hladinou akustického tlaku v třetinooktávových pásmech o středních kmitočtech 1 až 16 Hz. V prvním případě je limitní hodnota hladiny akustického tlaku rovna 116 dB a v druhém případě 110 dB. Maximální přípustná hodnota hladiny akustického tlaku v třetinooktávových pásmech, o dříve jmenovaných kmitočtech, nesmí překročit 137 dB, pokud je osoba vystavena působení infrazvukových vlnění při krátkodobé expozici, tedy v délce trvání méně než 8 minut.

Stanovení limitních hodnot nízkofrekvenčního hluku a infrazvuku v komunálním prostředí je velmi obtížné a evropské země ani USA závazný limit pro komunální prostředí nemají. Stejně je tomu tak i v České republice, kde limit rovněž nebyl stanoven.

To ale neznamená, že neexistuje žádné omezení infrazvuku a nízkofrekvenčního hluku. V EU se vyskytují tři systémy posuzování:

1. váhový filtr G normovaný v ČSN ISO 7196 bez limitní hodnoty:

- doporučená hodnota $L_{\text{Geq},T} = 90$ dB
- doporučená hodnota pro obytné místnosti, třídy a kanceláře v Dánsku $L_{\text{Geq},T} = 85$ dB tento systém se již příliš nepoužívá, neboť je navržen pro infrazvuk, nf hluk podhodnocuje

2. limitování váhovým filtrem A v třetinooktávových pásmech 10 – 160 Hz, Dánsko 1997:

- $L_{pA,LF} = 20$ dB v chráněném vnitřním prostoru pro večerní a noční dobu, 25 dB pro denní dobu. Tento systém je vhodný především pro harmonické tóny a vykazuje dobrou shodu s výpovědí obtěžovaných.

3. limitování jednotlivých třetinooktávových pásem:

- hladiny prahů slyšení v ČSN ISO 226
- směrné křivky (criterion, reference curves) různé ve státech EU: Švédsko SOSFS 1996:7, Německo DIN 45680 1997, Nizozemí 1999, Polsko 2001, návrh Velká Británie 2005

- ČR: hladiny prahu slyšení L_{PS} v příloze 1 nařízení vlády č.272/2011 Sb., o ochraně před nepříznivými účinky hluku a vibrací

Tabulka 3: Hladiny prahu slyšení L_{PS} v rozsahu středních kmitočtů třetinooktávových pásem f_i [14].

f_i (Hz)	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160
L_{PS} (dB)	92	87	83	74	64	56	49	43	42	40	38	36	34

Jak již bylo uvedeno hygienický limit pro oblast nízkofrekvenčního hluku stanoven legislativně není, ale již se dle uvedeného nařízení vlády posuzuje tónová složka v oblasti nízkých frekvencí, resp. uplatňuje se případná korekce na její rušivost v případě překročení hladiny prahu slyšení.

Hlukem s tónovými složkami se rozumí hluk, v jehož kmitočtovém spektru je hladina akustického tlaku v třetinooktávovém pásmu, případně i ve dvou bezprostředně sousedících třetinooktávových pásmech, o více než 5 dB vyšší než hladiny akustického tlaku v obou sousedních třetinooktávových pásmech a v pásmu kmitočtu 10 Hz až 160 Hz je ekvivalentní hladina akustického tlaku v tomto třetinooktávovém pásmu $L_{teq,T}$ vyšší než hladina prahu slyšení stanovená pro toto kmitočtové pásmo.

Tento hluk se v přírodě běžně nevyskytuje a je velmi obtěžující. Člověk ho vnímá jako ohrožení, a v tomto případě je posuzování pouze ekvivalentní hladinou akustického tlaku $L_{Aeq,T}$ chybou.

Netónový hluk se v přírodě běžně vyskytuje (les, voda, vítr) a obecně není považován za obtěžující, neboť lidský sluch je na něj dlouhodobě zvyklý a posuzování pouze ekvivalentní hladinou akustického tlaku $L_{Aeq,T}$ v tomto případě není chybou. Protože však nelze dopředu říci, zda nebude v netónovém hluku přítomna i tónová složka, provádí se měření a posuzování třetinooktávového spektra vždy.

V současné legislativě ČR se používají hladiny prahu slyšení L_{PS} navázané na přítomnost tónové složky.

[14], [59], [60]

8. Pracoviště zabývající se měřením infrazvuku a jeho vlivem na lidský organismus

Při Zdravotním ústavu se sídlem v Ostravě působí **Národní referenční laboratoř pro komunální hluk** sídlící v Ústí nad Orlicí. Laboratoř je pověřena odbornou garancí v činnostech specifikovaných ve statutu, který je součástí tohoto jmenování, včetně působení jako Národní referenční centrum pro hluk (National Reference Center for Noise) v rámci mezinárodní sítě EIONET.

Předmět činností:

- **Referenční (rozhodčí) činnosti:** provádí referenční expertízy (měření, výpočty, posouzení atd.) v případech odvolání a stížností na postup orgánů ochrany veřejného zdraví jako podklad pro rozhodnutí odvolacího orgánu
- **Speciální měření a poradenství:** podílí se na náročných měřeních a expertízách vyžadujících speciální vybavení nebo postupy na základě požadavků jednotlivých subjektů hygienické služby i dalších subjektů
- **Metodická činnost:** připravuje podklady pro novelizaci legislativy v oblasti měření a hodnocení hluku v komunálním prostředí, vytváří, zpracovává nebo posuzuje návrhy postupů měření, výpočtů, hodnocení a technického vybavení včetně programů pro elektronické zpracování
- **Výzkumná a vývojová činnost:** zkoumá a vyvíjí měřicí a výpočetní postupy a zpracovatelské programy a provádí jejich validaci, podílí se na aplikovaném výzkumu, přitom spolupracuje se SZÚ, jinými odbornými pracovišti a odbornými společnostmi v ČR i zahraničí, spolupracuje s dalšími pracovišti i mimo resort zdravotnictví, které mají podobný obor činnosti, sleduje odbornou technickou literaturu pro informaci pracovišť v ČR

Toto pracoviště bylo osloveno se záměrem provést konkrétní měření či se zúčastnit případových studií. Pracoviště bylo obeznámeno se zpracovávaným tématem bakalářské práce. Ze strany Národní referenční laboratoře pro komunální hluk, i přes značné pracovní vytížení, byly poskytnuty cenné rady a doporučení ke zpracovávanému tématu. Velmi užitečná byla i návštěva tohoto pracoviště, kde došlo k seznámení s některými pracovníky, ukázce měřicí a vyhodnocovací techniky a mnoha dalšímu. Bohužel však nebylo možné provést, respektive se zúčastnit, měření, která by mohla být použita v této práci. Naskytla se však možnost toto měření uskutečnit v rámci navazující diplomové práce.

Vzhledem k tomu, že téma této bakalářské práce se významně kryje s obsahem disertační práce zpracovávané tímto pracovištěm, nebylo možné konfrontovat výsledky jejich práce (nebyla dosud publikována) s výsledky, které uvádí dostupná literatura.

[61]

9. Návrhy a doporučení pro provedení reálných měření – použití měřících přístrojů a sledování indikátorů

V rámci této části práce jsou navrženy měřící systémy dostupné na trhu k provedení reálných měření – posouzení vlivů infrazvuku a nízkofrekvenčního hluku na lidský organismus a doporučeny indikátory ke sledování.

9.1 Měřící systémy (řetězce)

Mezi přední světové výrobce v oblasti měření zvuku patří zejména společnosti G.R.A.S. a Brüel & Kjaer. V této části jsou uvedeny možné měřící systémy právě od těchto firem.

G.R.A.S. je dánská firma, která klade důraz na kvalitu materiálu a dílů, které jsou vybírány a zpracovány tak, aby zajistily dlouhodobou stabilitu a odolnost. Všechny díly jsou vyrobeny a smontovány v továrně v Dánsku. Membrána mikrofону, tělo a ochranná mřížka jsou vyrobeny z nerezové oceli a dělají mikrofonní sadu odolnou proti fyzickému poškození i korozi způsobené agresivním vzduchem nebo plyny.

Základem měřícího systému je mikrofón a předzesilovač. Moderním řešením je tzv. set. Jedná se o kombinaci mikrofónu a předzesilovače, jejíž výhoda spočívá v jednoduchosti, spolehlivosti a zejména v tom, že set je kalibrován jako jeden celek. To eliminuje chyby, protože je zde pouze jedna hodnota citlivosti.

G.R.A.S. 46AN 1/2" LEMO Free-fieldStandard Microphone Set, Low Frequency (obrázek 11) je mikrofonní set určený pro měření ve volném poli (free-field). Tento set je určen k měření hluku zdroje zvuku, jehož pozice je známá a je vhodný pro měření nízkých frekvencí, vycházejících např. z větrných elektráren.

Mikrofón použitý v tomto setu je G.R.A.S. 40AN 1/2". Tento mikrofón je externě polarizovaný a jeho výhodou je dlouhodobá spolehlivost v různých prostředích. Předzesilovač je G.R.A.S. 26AI se 7-pinovým LEMO konektorem. Mezi jeho výhody patří jeho vlastní nízký šum a široké frekvenční spektrum. Set vyžaduje externí napájecí modul, nebo připojení analyzátoru, což předzesilovači dodává 200 V polarizační napětí. Vhodné je připojení G.R.A.S. 12AQ 2-Channel Universal Power Module with signal conditioning and PC interface. Tento modul je zdrojem polarizačního napětí, obsahuje různé typy filtrů, ale také možnost připojení externích filtrů. Jedná se o dvou kanálový modul, což umožňuje dvě na sobě nezávislá měření, a je vybaven počítačovým rozhraním RS-232.



Obrázek 11: G.R.A.S. 46AN 1/2" LEMO Free-fieldStandard Microphone Set[62].

Firma G.R.A.S. má ve svém sortimentu také set s názvem **47AC 1/2" CCP Infra-Sound Microphone Set**, jedná se o speciální set určený přímo pro měření infrazvukových frekvencí. Je vybaven mikrofonom 47AC, integrovaným nízkofrekvenčním adaptérem se speciálně navrženým systémem vyrovnávání tlaku a specializovanými předzesilovači. Aby bylo možné měřit tyto velmi dlouhé vlnové délky, potřebuje systém vyrovnávání tlaku delší dobu na ustálení. Doba závisí na okolním prostředí, avšak povětšinou stačí 30 sekund po stabilizování okolního tlaku. Důležitou věcí je u všech systémů pro měření nízkých frekvencí vhodně zvolený frekvenční analyzátor, popřípadě zvukoměr, neboť mnoho z nich využívá hornopropustný filtr, který by mohl potlačit nízké frekvence. Pro tento set je doporučován například modul GRAS 12AL power CCP.

Další možností pro měření nízkých frekvencí je **G.R.A.S. 40HT 1/2" Lownoise Microphone System** zobrazený na **obrázku 12**. Součástí tohoto systému je mikrofón G.R.A.S. 40AH, předzesilovač G.R.A.S. 26HG s adaptérem G.R.A.S. GR0010 for the 1/2-inch microphone, který přímo propojuje mikrofón a předzesilovač a nedochází tedy k útlumu. Další součástí je speciální jednotka pro zesílení a filtrování G.R.A.S. 26HT. K tomuto systému je nutné pořídit napájecí modul. Vhodným kandidátem je například G.R.A.S. 12HF.

[36], [62]



Obrázek 12: G.R.A.S. 40HT 1/2" Lownoise Microphone Systém [62].

Společnost **Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S** je dánská firma, kterou založili Per Vilhelm Brüel a Viggo Kjær v roce 1942. Tato firma je přední světový výrobce a dodavatel řešení zvuku a vibrací, v této oblasti se řadí mezi světové lídry. Zabývá se řešením problémů se zvukem a vibracemi, v oblasti od měření provozního hluku a vibrací v motorech automobilů až po vyhodnocení akustiky budov a řízení kontroly kvality.

U firmy Brüel & Kjaer je vhodné pro měření nízkých frekvencí použít set **4193-L-004 - ½-inch pressure-field microphone with Type 2669-L preamplifier and infrasound adaptor, 200 V polarization**. Jedná se o kombinaci externě polarizovaného mikrofону Type 4193 a zesilovače Type 2669-L opatřeným opět 7-pinovým LEMO konektorem. I tento set vyžaduje přívod externího polarizačního napětí.

Další možností jak měřit je pokročilejším ručním analyzátozem, který má dostupné potřebné vybavení pro přesné měření. Těmto požadavkům vyhovuje analyzátor firmy **Brüel & Kjær Type 2270 (2250)** zobrazený na **obrázku 13**. Přístroj využívá mikrofón Type 4189 a předzesilovač ZC-0032, jehož specifikace není uvedena. Jedná se o všestranné přístroje s možností např. FFT analýza hluku, určení akustického výkonu a akustické intenzity (typ 2270) a mimo jiné zejména měření infrazvuku pomocí váhového filtru G.

Mezi standardní příslušenství k měření patří např. externí filtry, prodlužovací kabely, držáky mikrofónu a stativ s regulovatelným nastavením výšky. Dále jsou důležitou součástí ochrany mikrofónů jako nosecony (chrání před turbulencí způsobenou laminárním prouděním), ochrany mikrofónu před větrem nebo deštěm. Signály mohou být vedeny přímo do zvukoměru, který

zpracovává data a zobrazuje výsledky, popřípadě mohou být data ukládána do externího úložiště a dále zpracovávána např. v počítači s příslušným softwarem.



Obrázek 13: Brüel & Kjær Type 2250 [63].

Srovnání zmíněných mikrofonů a předzesilovačů je uvedeno v **tabulkách 4 a 5**. Pokud pole není vyplněno, firma tento údaj neuváděla.

[17], [35], [37], [39], [63]

Tabulka 4: Srovnání mikrofonů [35], [36], [39], [62], [63].

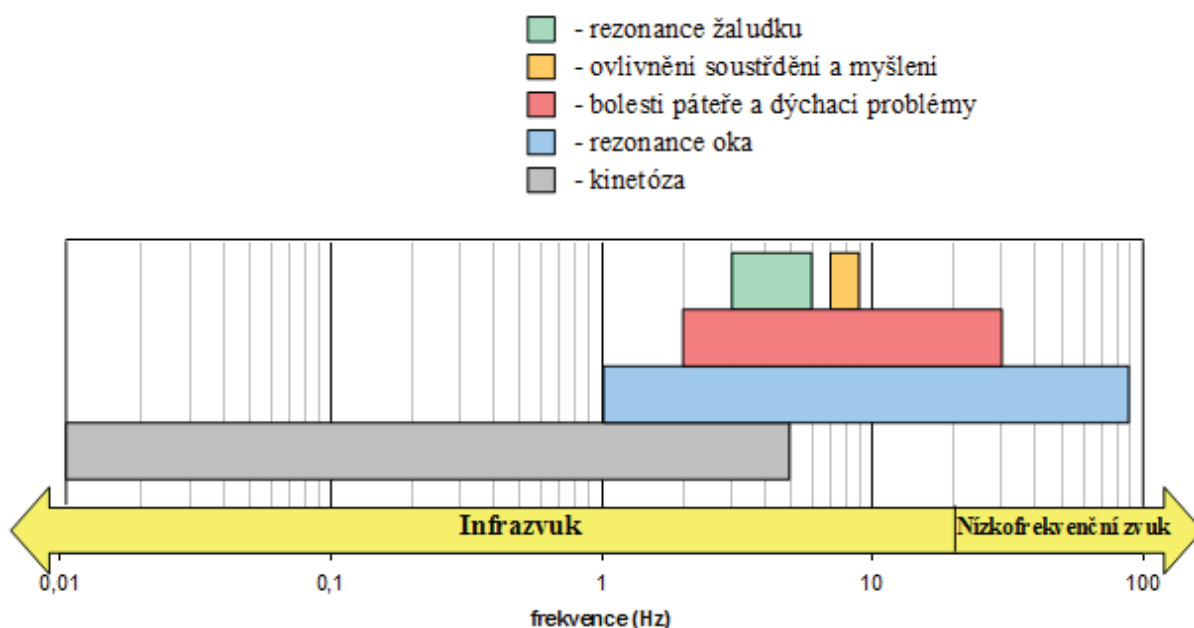
Firma	G.R.A.S.	G.R.A.S.	G.R.A.S.	Brüel & Kjaer	Brüel & Kjaer
Model	40AN	40AH	47AC	Type 4193	Type 4189
Velikost (")	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
Frekvenční rozsah (Hz)	0,5-20000	6-20000	0,09-20000	0,07-20000	6,3-20000
Dynamický rozsah (dB)	14-149	6,5-113	20-148	19-162	14,6-146
Kapacita (pF)	16,5	-	-	18	14
Citlivost (mV/Pa)	50	-	8	12,5	50
Polarizační napětí (V)	200	200	-	200	0
Provozní teploty (°C)	-40-150	-20-60	-30-70	-30-300	-30-150

Tabulka 5: Srovnání předzesilovačů [35], [36], [39], [62], [63].

Firma	G.R.A.S.	G.R.A.S.	Brüel & Kjaer
Model	26AI	26HG	2669-L
Velikost (")	1/2	1/4	1/2
Frekvenční rozsah (Hz)	1-200000	1-200000	3-200000
Vstupní impedance ($G\Omega$)	40	40	15
Výstupní impedance (Ω)	75	75	-
Max. výstupní napětí (V)	50	50	55
Citlivost (mV/Pa)	50	800	50
Provozní teploty ($^{\circ}C$)	-30-70	-30-70	-30-150
Konektor	LEMO 7-pin	LEMO 7-pin	LEMO 7-pin
Vlastní šum (μV)	1,8	1,8	1,9
Zeslabení (dB)	0,29	0,29	<0,35
Rychlost přeběhu ($V/\mu s$)	20	20	-

9.2 Indikátory

Vlivu infrazvuku a nízkofrekvenčního hluku na lidský organismus a závěrům dostupných studií se věnuje samostatná část této práce (**kapitola 6**). Určování indikátorů je problematickou záležitostí, vzhledem k tomu, že v této oblasti není mnoho konkrétních závěrů a není zcela probádána. Na základě závěrů uvedených v této práci lze doporučit ke sledování indikátory s fyziologickými účinky infrazvuku na lidské tělo uvedené na **obrázku 14**:



Obrázek 14: Účinky infrazvuku na lidské tělo.

10. Závěr

Cílem této práce bylo získat informace o dostupné literatuře pro měření a vyhodnocování infrazvuku a jeho vlivu na lidský organismus, včetně jejich uplatnění ve vyhodnocování skutečných záznamů infrazvuků. Dále pak definovat důležité vlastnosti infrazvuku v souvislosti se sledováním vlivu na lidský organismus.

Ve svém úvodu se v této bakalářské práci zabývám obecnějšími informacemi z oblasti akustiky a zvuku. Dále se soustředím na vlastnosti infrazvuku, techniky a prostředky pro měření a vyhodnocování nízkofrekvenčního hluku. Uvádím způsoby měření infrazvukových vlnění, určování jejich akustických hladin, zjišťování frekvenčního spektra prostřednictvím frekvenční analýzy a určování a lokalizaci zdrojů infrazvuku.

Věnuji se rovněž účinkům hluku na lidské zdraví, legislativním limitům pro hluk a pracovišti v ČR – Národní referenční laboratoři pro komunální hluk sídlící v Ústí nad Orlicí, která působí při Zdravotním ústavu se sídlem v Ostravě jako Národní referenční centrum pro hluk (National Reference Center for Noise) v rámci mezinárodní sítě EIONET.

Získané znalosti a dostupné prameny z oblasti měření a vyhodnocování infrazvuku jsem použil při návrhu měřicího řetězce (měření hluku a sledování příslušných indikátorů). Shrnuj poznatky a závěry z provedených studií vlivu nízkofrekvenčního hluku (infrazvuku) na lidský organismus, které byly dosud prokázány provedenými měřeními a výzkumy.

Závěrem lze říci, že nízkofrekvenční hluk a jeho vliv na lidský organismus je v současné době stále více aktuální otázkou a kontroverzním tématem z pohledu závěru příslušných studií. Řada lidí si neuvědomuje nepříznivý vliv hluku na lidské zdraví. Nedomýšlí, co všechno může hluk způsobit, ať již z pohledu psychického či fyzického zdraví člověka.

V budoucnu lze předpokládat zkvalitnění prováděných měření infrazvukových vlnění a určování jejich zdroje za použití kvalitnějších a přesnějších měřících přístrojů a také vývoje nových metod pro zjišťování a posuzování negativních dopadů infrazvuku na lidskou populaci, které by měly přispět ke snížení či eliminaci těchto negativních dopadů.

Řešené téma bakalářské práce poskytl ucelený přehled o měření a vyhodnocování infrazvuku a jeho vlivu na lidský organismus. Naskýtá se jedinečná možnost spolupráce s Národní referenční laboratoří pro komunální hluk sídlící v Ústí nad Orlicí v rámci případové studie, zpracování diplomové práce, kde lze uplatnit získané znalosti z řešeného tématu. Zároveň již pak bude možné použít závěry z v současné době zpracovávané disertační práce, a ty konfrontovat s dosavadními a nově dosaženými závěry studií.

11. Seznam použité literatury

- [1] MEDVEDOVÁ, I., Česká nezávislá společnost snižující hluk: Základy akustiky, Příručka pro začátečníky, 2011 [cit. 2015-01-11]. Dostupné z: <http://www.greif.cz/download/its075-zaklady-akustiky-prirucka-pro-zacatecniky.pdf>
- [2] Akustika, základní pojmy a veličiny v akustice. In: *Ústavu fyziky a materiálového inženýrství: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně* [online]. 12.5.2009 [cit. 2015-01-11]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_02.pdf
- [3] Akustické vlnění. In: *Fyzikální webové stránky: webFyzika* [online]. [cit. 2015-02-11]. Dostupné z: <http://webfyzika.fsv.cvut.cz/PDF/prednasky/akustika.pdf>
- [4] SCHAUER, Pavel. Vybrané statě z akustiky. In: *FAST: Ústav fyziky* [online]. 2008 [cit. 2015-01-11]. Dostupné z: http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka_schauer/vybrane_stat_e_z_akustiky.pdf
- [5] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky: ZVUKOVÉ VLNĚNÍ* [online]. 2006 [cit. 2015-01-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/152-zvukove-vlneni>
- [6] NĚMEČEK, Pavel. Akustická diagnostika. In: *KATEDRA VOZIDEL A MOTORŮ: Technická univerzita v Liberci* [online]. Copyright © 2002-2004 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: http://www.kvm.tul.cz/studenti/texty/technicka_diagnostika/In-TECH%20_%20Akusticka_diagnostika.pdf
- [7] BERNAT, Petr. *Akustika, vznik a šíření zvuku, frekvenční analýza a syntéza, sluchový vjem zvukového signálu* [online]. [cit. 2014-11-13]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm
- [8] UHROVÁ, Helena. Zvuk a akustika. In: *Vysoká škola chemicko-technologická v Praze: Fakulta chemicko-inženýrská* [online]. © 2010-2011 [cit. 2014-11-22]. Dostupné z: <http://fchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/nano/predmety/biofyzika/Zvuk-a-akustika.pdf>
- [9] JAKSCH, Ivan. Technická diagnostika: Základy akustiky a hlukové diagnostiky. *Ústav řízení systémů a spolehlivosti* [online]. 2010. [cit. 2015-07-24]. Dostupné z: http://www.rss.tul.cz/download/tdg/P7_hluk_ESF.pdf
- [10] Akustická měření ve strojírenství. *Ústav konstruování* [online]. [cit. 2015-01-24]. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/ZEM/ZEM_prednaska10.pdf

- [11] MIŠUNA, Vojtěch. Experimentální analýza hluku. In: *Biomechanika 2: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství* [online]. 2010 [cit. 2014-11-22]. Dostupné z: http://biomechanika.fme.vutbr.cz/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=85%3Aexperimentalni-analyza-hluku&id=4%3Afrvs_stodola&Itemid=96&lang=cs
- [12] SKARNITZL, Radek. Zvuk. In: *Filozofická fakulta univerzity Karlovy v Praze: Fonetický ústav* [online]. [cit. 2014-11-22]. Dostupné z: http://fu.ff.cuni.cz/vyuka/akustika/1_zvuk.pdf
- [13] Nebezpečný hluk. In: *Evropská agentura pro bezpečnost a ochranu zdraví při práci* [online]. Praha: Výzkumný ústav bezpečnosti práce, 2005 [cit. 2015-01-12]. ISBN 80-903604-8-3. Dostupné z: http://osha.europa.eu/fop/czech-republic/cs/publications/files/prirucka_hluk.pdf
- [14] POTUŽNÍKOVÁ, Dana. *Aktualizace Posouzení vlivu hluku, stroboskopického efektu a elektromagnetického záření na veřejné zdraví 22/Ing.DP/2008* [online]. Ústí nad Orlicí, 2009 [cit. 2015-02-12]. Dostupné z: <http://kozy.cz/elektrarna/priloha4.pdf>
- [15] HAVRÁNEK, Jiří. *Hluk a zdraví*. Praha, 1990. ISBN 80-201-0020-2.
- [16] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 400 s. ISBN 978-80-01-04347-9.
- [17] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace: měření a hodnocení*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 1998, 188 s. ISBN 80-901-9362-5.
- [18] ŽIARAN, Stanislav. *Znižovanie hluku a kmitania: měření a hodnocení*. 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 1997, 267 s. Edícia skript. ISBN 80-227-1009-1.
- [19] ŽIARAN, Stanislav. *Ochrana človeka pred kmitaním a hlukom: měření a hodnocení*. 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2001, 254 s. Edícia monografií. ISBN 80-227-1607-3.
- [20] HORÁČEK, Jaroslav. *Anatomie pro bakalářské studium se zdravotnickým zaměřením*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006, 113 s. ISBN 80-248-1203-7
- [21] ČSN ISO 7196. *Akustika - Frekvenční váhová funkce pro měření infrazvuku*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 12 s.
- [22] LEVENTHALL, Geoff. What is infrasound? *Prog Biophys Mol Biol*, January–April 2007. Volume 93, Issues 1–3, Pages 130–137. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079610706000848>
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16934315>

- [23] O'NEAL, Robert D., Robert D. HELLWEG a Richard M. LAMPETER. A Study of Low Frequency Noise and Infrasound from Wind Turbines. *Epsilon Associates, Inc.* [online]. 2009, 2433-01 [cit. 2014-11-22].
Dostupné z: http://www.nexteraenergyresources.com/pdf_redesign/Epsilon_study.pdf
- [24] Low Frequency Noise: Technical Research Support for DEFRA Noise Programme. *Casella stanger* [online]. 2001 [cit. 2014-11-22].
Dostupné z: <http://www.scotland.gov.uk/Resource/Doc/158512/0042973.pdf>
- [25] Infrasound – Briew Review of Toxicological Literature, 2001, listopad, [cit. 2014-11-22],
Dostupné z: http://ntp.niehs.nih.gov/ntp/htdocs/Chem_Background/ExSumPdf/Infrasound.pdf
- [26] GUŽAS, D. a R. VIRŠILAS. *Infrasound hazards for the environment and the ways of protection. Ultragarsas / Kauno Technologijos universitetas* [online]. 2009, roč. 64, č. 3 [cit. 2015-01-12]. ISSN 1392-2114.
Dostupné z: http://www.ktu.lt/ultra/journal/pdf_64_3/Vol.64-No.3-2009_06-Guzas.pdf
- [27] JIRÁSKA, Aleš. Infrazvuk - otázky a odpovědi. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. [cit. 2015-01-12]. Dostupné z: <http://csve.cz/clanky/infrazvuk-otazky-a-odpovedi/64>
- [28] Infrazvuk varuje a kontroluje. *21. století* [online]. 2004 [cit. 2015-01-12].
Dostupné z: <http://21století.cz/2004/03/19/infrazvuk-varuje-a-kontroluje/>
- [29] JIRÁSKA, Aleš. Hluk větrných elektráren. NÁRODNÍ REFERENČNÍ LABORATOŘ PRO MĚŘENÍ A POSUZOVÁNÍ HLUKU V KOMUNÁLNÍM PROSTŘEDÍ. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. Ústí nad Orlicí [cit. 2015-02-12].
Dostupné z: http://www.csve.cz/pdf/cz/Hluk_vetrnych_elektraren.pdf
- [30] Měření hluku a vibrací zvukoměrem. In: *Acoustic group: Department of physics CTU FEE* [online]. © 2011 [cit. 2014-11-12].
Dostupné z: http://acs.feld.cvut.cz/teach/uak_files/uloha1.pdf
- [31] Manuál měření hluku v roce 2010. *Státní zdravotní ústav* [online]. 2010 [cit. 2014-11-22].
Dostupné z: http://www.szu.cz/uploads/documents/chzp/hluk/Manual_hluk_2010.pdf
- [32] BERGLUNDA, Birgitta a Peter HASSMÉN. Sources and effects of low-frequency noise. *Waubra foundation* [online]. Stockholm, 1996 [cit. 2014-11-22]. Dostupné z: <http://waubrafoundation.org.au/wp-content/uploads/2014/07/Berglund-et-al-Sources-Effects-of-Low-Frequency-Noise-1996.pdf>

- [33] BROTHÁNEK, Marek, Ondřej JIŘÍČEK a Vojtěch JANDÁK. Zvukoměr: akustický analyzátor. In: *Otevřená věda* [online]. 2005 [cit. 2015-01-22]. Dostupné z: http://archiv.otevrena-veda.cz/users/Image/default/C1Kurzy/Fyzika/21_jiricek.pdf
- [34] ČSN EN 61672-1: Elektroakustika – Zvukoměry – Část 1: Technické požadavky. Praha: Český normalizační institut, 2003. 36 s.
- [35] *Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement* [online]. Copyright © Brüel & Kjær. [cit. 2015-02-22]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/>
- [36] G.R.A.S. Product Catalogue: Measurement Microphones. *G.R.A.S. Sound & Vibration* [online]. [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: http://www.gras.dk/media/MiscFiles/SalesMat/GRASProductCatalogue_WEB.pdf
- [37] Measurement microphones. *Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement* [online]. Second edition. 1994 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/br0567.pdf>
- [38] Technical documentation Microphone Handbook: For the Falcon™ Range of Microphone Products. *Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement* [online]. Copyright © 1994, 1995, Brüel & Kjær A/S. 1995 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/be1373.pdf>
- [39] TRANSDUCERS AND CONDITIONING. *Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement* [online]. [cit. 2015-07-25]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/bf0236.pdf>
- [40] BEST PRACTICES: Handling and Cleaning Condenser Microphones. *Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement* [online]. [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: <http://bksv.com/doc/br8037.pdf>
- [41] ORGANIZED BY THE SOCIETY OF INSTRUMENT AND CONTROL ENGINEERS (SICE), Japan. *Proceedings of SICE annual conference 2008, August 20 - 22, the University of Electro-Communications (UEC), Chofu, Tokyo, Japan*. Tōkyō: SICE, 2008. ISBN 978-490-7764-296. Dostupné také z: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4654612&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4654612
- [42] JAKSCH, Ivan. Technická diagnostika: Měření a diagnostika vibrací, Technická univerzita v Liberci: Fakulty mechatroniky, informatiky a mezioborových studií [online]. 2010 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: http://www.rss.tul.cz/ftppub/tdg/P8_vibrace%20_ESF.pdf
- [43] Measuring vibration. *Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement* [online]. Denmark, 1982 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/br0094.pdf>

- [44] ZUTH, Daniel a František VDOLEČEK. Snímače a měřicí technika: Měření vibrací ve vibrodiagnostice. In: Odborné časopisy [online]. 2010 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40375.pdf>
- [45] SHARP, J. H. Vibration Measurement. In: *University of Glasgow* [online]. © 2012 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: <http://www.mech.gla.ac.uk/~sharpj/vibration.pdf>
- [46] RION - Sound and vibration. In: Scantek, Inc. [online]. 2008 [cit. 2012-02-04]. Dostupné z: <http://www.scantekinc.com/datasheets/rionsoundvib.pdf>
- [47] Infrasound. In: *Lofar* [online]. © 2012 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: <http://www.lofar.org/geophysics/infrasound/infrasound>
- [48] LE PICHON, Alexis, Elisabeth BLANC a Alain HAUCHECORNE. *Infrasound monitoring for atmospheric studies* [online]. New York: Springer, 2010. [cit. 2014-11-23]. ISBN 14-020-9507-4. Dostupné z: <http://www.springer.com/us/book/9781402095078>
- [49] LASTOVICKA, J., J. CHUM a T. SINDELAROVA. Czech Infrasonic Monitoring System: Measurements in an Earthquake Epicenter. In: *The SAO/NASA Astrophysics Data System* [online]. 2010 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010AGUFM.S51D..03L>
- [50] Měření hlukových emisí elektrických strojů. *Ústav elektroenergetiky* [online]. [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/images_laboratory/Diagnostika/Files/03_Mereni_hlukovych_emisi_elektrickych_stroju.pdf
- [51] NÍZKOFREKVENČNÍ HLUK Z VENKOVNÍ PRODUKCE HUDBY A JEHO VLIV NA ZDRAVÍ NEZÚČASTNĚNÝCH OSOB V OKOLÍ. JUNEK, Pavel, Dana POTUŽNÍKOVÁ, Tomáš HELLMUTH, Lubomír PÍŠA a Ivan KUČERA. *Státní zdravotní ústav* [online]. 2011 [cit. 2015-03-03]. Dostupné z: <http://apps.szu.cz/svi/hygiena/archiv/h2011-1-03-full.pdf>
- [52] O'NEAL, Robert D., Robert D. HELLWEG a Richard M. LAMPETER. A Study of Low Frequency Noise and Infrasound from Wind Turbines. *Epsilon Associates, Inc.* [online]. 2009, 2433-01 [cit. 2015-03-03]. Dostupné z: http://www.nexteraenergyresources.com/pdf_redesign/Epsilon_study.pdf
- [53] Systém monitorování zdravotního stavu obyvatelstva ve vztahu k životnímu prostředí: Zdravotní důsledky a rušivé účinky hluku. STÁTNÍ ZDRAVOTNÍ ÚSTAV PRAHA. *Státní zdravotní ústav* [online]. Praha, 2005 [cit. 2015-03-03]. Dostupné z: http://www.szu.cz/uploads/documents/chzp/odborne_zpravy/OZ_04/hluk_04.pdf

- [54] SCHUST, M. Effects of low frequency noise up to 100 Hz. *Noise and Health* [online]. 2004, [cit. 2015-03-03]. Dostupné z: <http://www.noiseandhealth.org/article.asp?issn=1463-1741;year=2004;volume=6;issue=23;spage=73;epage=85;aulast=Schust>
- [55] Health Effects of Exposure to Ultrasound and Infrasound. HEALTH PROTECTION AGENCY.GOV.UK [online]. © Health Protection Agency. 2010 [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/335014/RCE-14_for_web_with_security.pdf
- [56] HOWARD, David M a Jamie A ANGUS. *Acoustics and psychoacoustics*. 4th ed. Amsterdam: Focal Press, 2009, viii, 488 s. ISBN 978-0-24-052175-6. Dostupné také z: http://www.pearl-hifi.com/06_Lit_Archive/14_Books_Tech_Papers/Howard_D-Angus_J/Acoustics_and_Psychoacoustics_4th_Edn.pdf
- [57] *Auditory cortex stimulation by low-frequency tones—An fMRI study* [online]. DOMMES, E., H. C. BAUKNECHT, G. SCHOLZ, Y. ROTHMUND, J. HENSEL a KLINGEBIEL. 2009 [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006899309020496>
- [58] OUIS, D. ANNOYANCE FROM ROAD TRAFFIC NOISE: A REVIEW. *Journal of Environmental Psychology* [online]. 2001, vol. 21, issue 1, s. 101-120 [cit. 2015-03-15]. DOI: 10.1006/jevp.2000.0187. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272494400901877>
- [59] Nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací, ve znění pozdějších předpisů.
- [60] METODICKÝ NÁVOD PRO MĚŘENÍ A HODNOCENÍ HLUKU A VIBRACÍ NA PRACOVIŠTI A VIBRACÍ V CHRÁNĚNÝCH VNITŘNÍCH PROSTORECH STAVEB. MINISTERSTVO ZDRAVOTNICTVÍ. *Státní zdravotní ústav* [online]. VĚSTNÍK MZ ČR. [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: http://www.szu.cz/uploads/documents/ska/autorizace/metodicky_navod_mereni_hluku_vibraci.pdf
- [61] *Národní referenční laboratoř pro komunální hluk při Zdravotní ústav se sídlem v Ostravě* [online]. Ústí nad Orlicí [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <http://www.nrl.cz/>
- [62] *G.R.A.S. Sound & Vibration* [online]. ©2013 G.R.A.S. Sound & Vibration A/S. All rights reserved. [cit. 2015-07-25]. Dostupné z: <http://www.gras.dk/>

- [63] USER MANUAL: Hand - held Analyzer Types 2250 and 2270. *Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement* [online]. © Brüel & Kjær. All rights reserved. [cit. 2015-03-25].
Dostupné z: <http://www.bksv.com/downloads/2250/be1713.pdf>